



OSTBAYERISCHE
TECHNISCHE HOCHSCHULE
REGENSBURG

Masterarbeit

zum Erlangen des akademischen Grades
Master of Science (M. Sc.)

**Analyse des Einflusses verschiedener Arbeitspunkte auf die
wirkleistungsabhängige Spannungssensitivität an einem
Mittelspannungsnetzknotten**

vorgelegt von:

Johanna Hartweg

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Oliver Brückl

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner

Betreuer:

M. Sc. Thomas Sippenauer

Studiengang: Elektromobilität und Energienetze
Fakultät: Elektro- und Informationstechnik
Institution: Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher
Matrikelnummer: 3225349
Datum der Fertigstellung: 26. Juni 2021

ERKLÄRUNG
ZUR MASTERARBEIT VON

Johanna Hartweg

im Studiengang

Elektromobilität und Energienetze

1. Mir ist bekannt, dass dieses Exemplar der Masterarbeit als Prüfungsleistung in das Eigentum der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg übergeht.
2. Ich erkläre hiermit, dass ich diese Masterarbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Regensburg, den 26.06.2021

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Untersuchung der wirkleistungsabhängigen Spannungssensitivität an den Knoten eines Mittelspannungsnetzstranges. Hierfür wird eine Reihe von Arbeitspunkten durch die Variation der Wirkleistungsentnahmen bzw. Einspeisungen an den Netzknoten sowie des Verschiebungsfaktors und der Spannungswertvorgabe am Bilanzknoten erzeugt. Die Ergebnisse zeigen eine direkte Abhängigkeit von der Spannung des untersuchten Netzknotens. Hierbei steigt die Sensitivität bei fallenden Spannungswerten. Diese können sowohl durch Wirk- und Blindleistungsbelastungen als auch durch eine veränderte Referenzspannung am Umspannwerk bedingt werden. Darüber hinaus liegt eine Beeinflussung durch die Wirkleistungsbelastung und deren Verteilung über den Netzstrang hinweg vor. Je höher die Belastung der Leitung bis zum Knoten der Flexibilität ausfällt sowie je stärker sich die Last hin zu diesem Punkt verlagert, desto höher ist die Sensitivität. Dies gilt ebenfalls für Arbeitspunkte mit gleichbleibender Spannung in den betrachteten Knoten. Des Weiteren wird die Anpassung eines multiplen linearen Regressionsmodells vorgenommen. Dieses ermöglicht eine Abschätzung der Sensitivitätswerte durch die Kenntnis einiger, die Belastungssituation des Netzes bestimmender Parameter.

Abstract

Within this thesis, the active power-dependent voltage sensitivity at the nodes of a medium-voltage grid line is investigated. For this purpose, a series of operating points is generated by varying the active power withdrawals or injections at the network nodes as well as the power factor and the voltage setpoint at the slack bus. The results show a direct dependence on the voltage of the investigated grid node, where the sensitivity increases with falling voltages. These can be caused by active and reactive power loads as well as by a changed reference voltage at the transformer substation. In addition, there is an influence by the active power load and its distribution across the power line. A higher load on the line up to the node of flexibility as well as a stronger shift of the load towards this point will result in a higher sensitivity. This is also applicable for operating points with constant voltage in the considered nodes. Furthermore, a multiple linear regression model is fitted. The model allows an estimation of the sensitivity values by the knowledge of several parameters determining the load situation of the network.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis	VI
Formelzeichenverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Hintergrund der Nutzung von Flexibilitäten	1
1.2 Einordnung und Zielsetzung.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen.....	6
2.1 Grundlagen elektrischer Energieversorgungsnetze	6
2.2 Grundlagen der Leistungsflussberechnung.....	11
2.3 Mathematische Vorgehensweise der Sensitivitätsanalyse.....	14
2.4 Aufbau und Struktur von Mittelspannungsnetzen	15
3 Untersuchung und Auswertung verschiedener Belastungsszenarien	17
3.1 Untersuchung von Arbeitspunkten mit ausschließlichem Wirkleistungsfluss an den PQ-Lasten.....	18
3.1.1 Vergleich der auf verschiedene Knoten bezogenen Sensitivitäten.....	19
3.1.2 Untersuchung von abweichenden Sensitivitätswerten bei konstanter Spannung.....	22
3.1.3 Formulierung einer Hypothese zur Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungs- Wirkleistungssensitivität	28
3.2 Untersuchung von Arbeitspunkten in allen Quadranten des P-Q- Diagramms	28
3.3 Untersuchungen bei variabler Spannung am Slack-Knoten	30
3.4 Anpassung eines linearen Regressionsmodells	35
3.5 Worst-Case und Best-Case-Betrachtung.....	40
4 Zusammenfassung und Ausblick.....	44

Anhang A Skripte	47
A.1 Python-Skript zur automatisierten Durchführung von Sensitivitätsanalysen in PowerFactory	47
A.2 Matlab-Skript zur schrittweisen Erstellung eines linearen Regressionsmodells.....	50
Anhang B Diagramme verschiedener Sensitivitätsverläufe	53
B.1 Sensitivitätsverläufe von Arbeitspunkten mit ausschließlichem Wirkleistungsfluss an den PQ-Lasten.....	53
B.2 Sensitivitätsverläufe bei variabler Spannung am Slack-Knoten	55
Anhang C Regressionsanalyse	58
Literatur	63

Abkürzungsverzeichnis

<i>AbLaV</i>	Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten
<i>BMWi</i>	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
<i>BNetzA</i>	Bundesnetzagentur
<i>dena</i>	Deutsche Energie-Agentur
<i>EnWG</i>	Energiewirtschaftsgesetz
<i>KL</i>	Klemmleiste
<i>SINTEG</i>	Schaufenster intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende
<i>UW</i>	Umspannwerk

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Symbole

b	Koeffizient des Regressionsmodells
B	Suszeptanz
F	Funktionalmatrix
G	Konduktanz
I	Elektrischer Strom
L	Induktivität
P	Wirkleistung
Q	Blindleistung
R	Resistanz
R^2	Bestimmtheitsmaß
R^2_{adj}	adjustiertes Bestimmtheitsmaß
S	Scheinleistung
S_{PV}	Sensitivitätsmatrix der wirkleistungsabhängigen Spannungssensitivität
U	Spannung (Außenleiterspannung)
x	Variable der unbekanntten Größe
X	Reaktanz
\mathbf{X}	Einflussgrößenvektor
\mathbf{y}	Zielgrößenvektor
Y	Admittanz
Z	Impedanz

Griechische Symbole

δ	Spannungswinkel
φ	Winkel der Phasenverschiebung des Stromes bezüglich der Spannung

Indizes unten

A	Anfang
B	Blindanteil
$diff$	Differenz
E	Ende, Einspeisefall
i	Laufindex
j	Laufindex
l	Längsanteil
L	Lastfall
N	Nennwert
n	Anzahl der Knoten
q	Queranteil
S	Slack-Knoten
W	Wirkanteil

Indizes oben

(0)	Arbeitspunkt
v	Iterationszähler

Mathematische Symbole

d	Differentialoperator
$\det(\mathbf{A})$	Determinante einer Matrix
$\text{diag}(\mathbf{A})$	Diagonalmatrix
Δ	Differenz
e	Eulersche Zahl
j	Imaginäre Zahl
∂	partielle Ableitung
$*$	komplexe Konjugation

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: π -Ersatzschaltbild einer Leitung (a) ; vereinfachtes Ersatzschaltbild (b) ...	8
Abbildung 2.2: π -Ersatzschaltbild eines Mittelspannungs-Drehstromkabels	9
Abbildung 2.3: P-Q-Diagramm im Verbraucherzählpfeilsystem [eigene Darstellung nach 18].....	10
Abbildung 3.1: Darstellung des Testnetzes bestehend aus einem Mittelspannungsstrang	18
Abbildung 3.2: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL3.....	19
Abbildung 3.3: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL3; niedriges Sensitivitätsniveau.....	21
Abbildung 3.4: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3	22
Abbildung 3.5: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3 (a) ; Tabelle der Betriebspunkte der allgemeinen Lasten mit entsprechender Sensitivität '3,3' in absteigender Reihenfolge (b) ; Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen (c)	23
Abbildung 3.6: Sensitivität '2,3' aufgetragen über die Spannung an KL3 (a) ; Tabelle der Betriebspunkte der allgemeinen Lasten mit entsprechender Sensitivität '2,3' in absteigender Reihenfolge (b) Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen (c)	25
Abbildung 3.7: Sensitivität '2,3' aufgetragen über die Spannung an KL2 (a) ; Tabelle der Betriebspunkte der allgemeinen Lasten mit entsprechender Sensitivität '2,3' in absteigender Reihenfolge (b) ; Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen (c)	26
Abbildung 3.8: Sensitivität '1,3' aufgetragen über die Spannung an KL3 (a) ; Tabelle der Betriebspunkte der allgemeinen Lasten mit entsprechender Sensitivität '1,3' in absteigender Reihenfolge (b) Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen (c)	27
Abbildung 3.9: Sensitivität '1,3' aufgetragen über die Spannung an KL1 (a) ; ausgewählte Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen (b)	27

Abbildung 3.10: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3; aufgeteilt in vier Quadranten; Last- und Einspeisefall	29
Abbildung 3.11: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3; bei variabler Spannung am Slack-Knoten	31
Abbildung 3.12: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3; bei variabler Spannung am Slack-Knoten und variablem $\cos\varphi$ der PQ-Lasten (a) ; mit Anpassung eines Polynoms 1. Ordnung (b)	33
Abbildung 3.13: Schrittweises lineares Regressionsmodell der Zielgröße $dUKnoten/dPFlex$ '3,3' von den Einflussgrößen in der Reihenfolge $P3, P2, P1$	39
Abbildung 3.14: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3; Markierung von Best- und Worst-Case	41
Abbildung B.1: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL1	53
Abbildung B.2: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL2	54
Abbildung B.3: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL3; mittleres Sensitivitätsniveau.....	54
Abbildung B.4: Sensitivitäten '1,1', '1,2', '1,3', '2,1', '2,2', '2,3', '3,1', '3,2' und '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL1	55
Abbildung B.5: Sensitivitäten '1,1', '1,2', '1,3', '2,1', '2,2', '2,3', '3,1', '3,2' und '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL2	56
Abbildung B.6: Sensitivitäten '1,1', '1,2', '1,3', '2,1', '2,2', '2,3', '3,1', '3,2' und '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3.....	57
Abbildung C.1: Schrittweises lineares Regressionsmodell der Zielgröße $dUKnoten/dPFlex$ '1,3' von den Einflussgrößen in der Reihenfolge der maximalen Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes.....	59
Abbildung C.2: Schrittweises lineares Regressionsmodell der Zielgröße $dUKnoten/dPFlex$ '2,3' von den Einflussgrößen in der Reihenfolge der maximalen Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes.....	60
Abbildung C.3: Schrittweises lineares Regressionsmodell der Zielgröße $dUKnoten/dPFlex$ '3,3' von den Einflussgrößen in der Reihenfolge der maximalen Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes.....	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Unterscheidung der Knotentypen für die Leistungsflussberechnung [nach 13, 16].....	12
Tabelle 2.2: Netz- und Spannungsebenen des deutschen Stromnetzes mit Angabe der jeweils geläufigen Außenleiterspannungen [nach 1, 15].....	15
Tabelle 3.1: Maximal auftretende Differenzen zwischen den Spannungswerten U_3 sowie den Sensitivitätswerten '3,3'; aufgeteilt in Last- und Einspeisefall.....	32
Tabelle 3.2: Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionsanalyse zur Ermittlung der die Sensitivität bestimmenden Knotenspannung	34
Tabelle 3.3: Einflussgrößen auf die Sensitivitäten absteigend sortiert nach dem Bestimmtheitsmaß der einfachen linearen Regressionsanalyse.....	36
Tabelle 3.4: Einflussgrößen auf die Sensitivitäten an KL3 sortiert nach der Aufnahmereihenfolge in das lineare Regressionsmodell	37
Tabelle 3.5: Adjustiertes Bestimmtheitsmaß des Modells der Sensitivitäten an KL3 der multiplen Regression nach Aufnahme je einer zusätzlichen Einflussgröße	38
Tabelle 3.6: Adjustiertes Bestimmtheitsmaß des Modells der Sensitivitäten der multiplen Regression nach Aufnahme je einer zusätzlichen Einflussgröße	39
Tabelle 3.7: Arbeitspunkte des Best- und Worst-Case-Szenarios; bei $UUW = 1$ p. u.	41
Tabelle 3.8: Abweichung der maximalen und minimalen Sensitivitätswerte; bei $UUW = 1$ p. u.	42
Tabelle 3.9: Arbeitspunkte des Best- und Worst-Case-Szenarios	42
Tabelle 3.10: Abweichung der maximalen und minimalen Sensitivitätswerte	43
Tabelle C.1: Bestimmtheitsmaße der einfachen linearen Regressionsanalyse zur Ermittlung der signifikanten Einflussgrößen auf die Sensitivitäten.....	58
Tabelle C.2: Einflussgrößen auf die Sensitivitäten sortiert nach der Aufnahmereihenfolge in das lineare Regressionsmodell.....	62
Tabelle C.3: Adjustiertes Bestimmtheitsmaß des Modells der Sensitivitäten der multiplen Regression nach Aufnahme je einer zusätzlichen Einflussgröße	62

1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende vollzieht sich die Abkehr der Erzeugung von Strom, Wärme und Mobilität aus der klimaschädlichen Nutzung fossiler Brennstoffe hin zu einer Energiegewinnung aus regenerativen Quellen. Die elektrische Energie stellt dabei eine besonders praktikable Energieform dar, da auf der einen Seite ihre Erzeugung aus einer Vielzahl von Primärenergieträgern möglich ist und sie auf der anderen Seite mit lediglich geringen Verlusten in alle Formen der Nutzenergie umgewandelt werden kann. Damit ist die elektrische Energie inzwischen unverzichtbar für eine Vielzahl von Prozessen im industriellen, öffentlichen und privaten Bereich. Neben den klassischen Nutzungsformen Licht, Wärme und Mobilität wird elektrische Energie auch für alle modernen Formen der Kommunikations- und Informationstechnik genutzt und ist speziell in diesem Bereich unentbehrlich [1]. Aus diesem Grund nimmt der Stromsektor in Deutschland eine maßgebliche Rolle bei einer umweltverträglichen und gleichzeitig sicheren und wirtschaftlichen Energieversorgung ein. Um die Versorgung im Sinne der Energiewende umstellen zu können, begann in den 1990er-Jahren in Deutschland der Zubau von Anlagen für die regenerative Stromerzeugung über die bis dahin bereits bestehende Wasserkraft hinaus. Vor allem Solar- und Windenergie stehen hierbei im Fokus. Im Jahr 2019 erreichten die erneuerbaren Energien einen Anteil am Bruttostromverbrauch von 42,1 % [2]. Damit einher geht eine verringerte Einspeisung aus konventionellen Kraftwerken.

1.1 Problemstellung und Hintergrund der Nutzung von Flexibilitäten

Bei der Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt diese leitungsgebunden. Um eine zuverlässige Versorgung anbieten zu können, muss das Versorgungsnetz sowohl ausfallsicher sein, als auch die Versorgungssicherheit aufrechterhalten. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) definiert den Begriff der Versorgungssicherheit in seinem Monitoringbericht [8] mit einer „angemessene(n) Deckung des Strombedarfs“. Somit ist die „Versorgungssicherheit gewährleistet, wenn die Nachfrage mit den verfügbaren Betriebsmitteln zur Bereitstellung und Verteilung von Elektrizität mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit gedeckt werden kann“. Da das Stromnetz jedoch in der Vergangenheit hauptsächlich auf die Einspeisung durch zentrale konventionelle Großkraftwerke ausgelegt wurde,

wird es durch den aktuell vollzogenen Strukturwandel vor neue Herausforderungen gestellt, wie sie das Diskussionspapier „Flexibilitäten im Stromversorgungssystem“ der Bundesnetzagentur [3] beschreibt: Die maßgeblichen Problemstellungen entstehen hierbei durch die Diskrepanz zwischen der dezentralen regenerativen Erzeugung und dem lokal auftretenden Energiebedarf sowohl im zeitlichen als auch im räumlichen Sinne. Zudem kommt zu einer schwer zu prognostizierenden Bedarfsseite zusätzlich eine erhebliche Prognoseunsicherheit in der Stromerzeugung hinzu. Da elektrische Energie nicht direkt im Stromnetz gespeichert werden kann, ist eine sichere Stromversorgung nur gewährleistet, solange Entnahme und Einspeisung in jedem Augenblick ausgeglichen sind. Durch den Zubau von erneuerbaren Energien und den damit einhergehenden Herausforderungen treten vermehrt Netzengpässe und Spannungsschwankungen auf. Dies deutet darauf hin, dass die anstehende Transportaufgabe durch die aktuell vorliegende Netzinfrastruktur nicht ausreichend gedeckt werden kann, womit es in Zukunft vermehrt zu Netzengpässen sowohl im Übertragungsnetz als auch im Verteilnetz kommen wird. Auf der Ebene der Übertragungsnetze können deren Betreiber zum Zwecke des Netzengpassmanagements auf einen einheitlichen Regelmechanismus zurückgreifen. Die Frequenz, welche bei einer Abweichung ihres Sollwerts von 50 Hz ein bilanzielles Systemungleichgewicht aufzeigt, kann durch marktbezogene Maßnahmen beeinflusst werden. Diese beinhalten den Einsatz von Redispatch-Maßnahmen und von im Voraus kontrahierten abschaltbaren Lasten gemäß der AbLaV. Ein Redispatch bezeichnet eine korrektive Verlagerung der Einspeisung durch das Absenken der Wirkleistungseinspeisung am Stranganfang sowie das gleichzeitige Anheben am Strangende des Engpasses. Da jedoch der Einsatz von AbLaV nur auf der Übertragungsebene stattfindet und die Potenziale einer Redispatch-Anwendung auf Verteilnetzebene sehr eingeschränkt sind, kommen dort hauptsächlich Einspeisemanagement-Maßnahmen zum Einsatz. Diese drosseln die Einspeisung von erneuerbaren Energien. Sowohl die Volumina des Einsatzes von Redispatch als auch des Einspeisemanagements haben einhergehend mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien deutlich zugenommen [3] und verursachen inzwischen hohe Kosten für die Stromkunden. Die Gesamtkosten für Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen nach §13 EnWG im Jahr 2019 betrugen ca. 1,2 Milliarden Euro [4].

Erzeuger, Lasten und Speicher, die in der Lage sind einen netzdienlichen Flexibilitätseinsatz anzubieten, können in Anbetracht dessen eine Unterstützung bei der Erhaltung der Versorgungs- und Systemsicherheit leisten. Physikalisch ist dies mit den bereits beschrie-

benen Netzengpassmanagement-Verfahren sowie dem Einsatz von Regelenergie gleichzusetzen. Zudem können Flexibilitäten bei einer hohen Residuallast, die dem gesamten Stromverbrauch abzüglich der Einspeisung aus regenerativen Erzeugungsanlagen entspricht, dazu beitragen, den Einsatz von konventionellen Kraftwerken zu diesen Zeitpunkten zu reduzieren. Des Weiteren hat der Einbezug flexibler Lasten und Einspeiser einen Einfluss auf die Netzausbauplanung. Deren netzdienlicher Einsatz kann an einigen Punkten eine kostengünstigere Variante zum konventionellen Netzausbau bieten und den Investitionsbedarf senken [5]. Insgesamt bietet somit der Einsatz von Flexibilitäten im Stromnetz das Potenzial, sich im Sinne des energiepolitischen Dreiecks auf die Erfüllung der Klima- und Umweltverträglichkeit, der Versorgungssicherheit und der Bezahlbarkeit der Energieversorgung positiv auszuwirken.

Da gegenwärtig das Engpassmanagement auf Verteilnetzebene maßgeblich auf Einspeisemanagement-Maßnahmen beruht, werden dort bisher neben Erzeugungsanlagen kaum andere Anlagen angesprochen. Längerfristig besteht jedoch die Möglichkeit, Lasten und Stromspeicher in diesen Prozess mit einzubeziehen. Ergänzend zu flexiblen erneuerbaren Erzeugern können demnach auch Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen und Batteriespeicher Flexibilitätsoptionen anbieten, wobei deren Potential in den kommenden Jahren weiter steigen wird [5]. Bei einem Abruf durch den Netzbetreiber können diese Flexibilitäten netzdienlich eingesetzt werden und den Engpass entlasten. [3]

1.2 Einordnung und Zielsetzung

Im bisherigen Stromsystem sind die Einsatzmöglichkeiten von netzdienlichen Flexibilitäten noch erheblich beschränkt [6]. Dennoch wurde aufgrund der eingangs in Abschnitt 1.1 beschriebenen Vorteile, die deren Anwendung bieten können, an vielen Stellen bereits ein Handlungsbedarf erkannt und aktiv mit der Ausarbeitung von Lösungen begonnen. Das BMWi lässt diesem Thema in seinem Ergebnispapier „Strom 2030“ [7] besondere Bedeutung zukommen. Dabei wird das Potenzial einer Erhöhung der Systemstabilität aufgegriffen sowie die Digitalisierung als hierfür benötigter Grundstein genannt. Es werden jedoch auch aktuell bestehende „Hemmnisse für marktgetriebene Flexibilität von Erzeugern und Verbrauchern“ erkannt und um diese abzubauen auf eine Entzerrung der Strompreissignale sowie ein gleichwertiger Marktzugang für alle Technologien verwiesen. In [3] werden diese Ansätze von der Bundesnetzagentur (BNetzA) weiter konkretisiert, um in Zukunft die Wirtschaftlichkeit von Flexibilitätseinsätzen zu gewährleisten und um den Netzbetreibern die Möglichkeit zu bieten, die jeweils effizienteste Maßnahme zu wählen.

Hierbei wird ein „Markt für netzdienliche Flexibilität“ in Erwägung gezogen. Auch die Deutsche Energie-Agentur (dena) erachtet den netzdienlichen Flexibilitätseinsatz als förderlich für das Stromsystem und betreibt hierzu ihre „Initiative Netzflex“ [6, 8]. Im Rahmen dieser Initiative fordert sie eine zügige Erschließung der Flexibilitätspotenziale und schlägt die im folgenden beschriebenen Maßnahmen vor: Zum einen sieht die dena einen Reformierungsbedarf für die aktuelle Netzentgeltsystematik, um diese verursachungsgerechter zu gestalten. Zum anderen soll zur Überwindung der bestehenden Hürden in der Anreizregulierung die Nutzung von Flexibilitäten als dauerhaft nicht beeinflussbare Kosten angerechnet werden. Zudem werden Modelle im Bereich der Niederspannung sowie in den darüber liegenden Spannungsebenen unterschieden. Aufbauend auf dem bereits bestehenden §14a EnWG können langfristige Flexibilitätszusagen durch reduzierte Netzentgelte für Flexibilitätsanbieter in der Niederspannung erzielt werden. Im Gegensatz hierzu sind laut dena sich am Markt frei bildende Preise in den höheren Netzebenen der effektivste Ansatz. Auch müssen unlautere Bieterverfahren verhindert sowie automatisierte Koordinationsprozesse zwischen den Akteuren etabliert werden.

Für einen möglichst effektiven Einsatz einer Flexibilität zur Behebung oder Vorbeugung eines Engpasses ist die Kenntnis über dessen Wirksamkeit von erheblicher Bedeutung. Um diese einschätzen zu können, finden sich hierzu in der Fachliteratur bereits einige Untersuchungen. [9] zeigt eine Variation der Sensitivität anhand räumlicher Gesichtspunkte. Diese ist höher, je weiter entfernt vom Bilanzknoten die Betrachtung angesetzt wird. Zu diesem Schluss kommt auch [10] und empfiehlt eine Variation der Leistung am Leitungsende, um den größtmöglichen spannungsbeeinflussenden Effekt zu erzielen. [11] untersucht, in welcher Weise die Spannungsempfindlichkeit von spezifischen Betriebsbedingungen abhängt, wobei eine Schaltung bestehend aus einem Referenzknoten sowie einem Einspeisepunkt verwendet wird. Auch hier wird wiederum eine Abhängigkeit der Sensitivität von der Lage des Einspeisepunkts, ausgedrückt durch die Leitungsimpedanz, festgestellt. Zudem zeigt [11] eine Steigerung der Sensitivität bei Absenkung der Referenzspannung sowie eine erhöhte Abhängigkeit der Spannung von der Impedanz für verschiedene Werte der eingespeisten Leistungen. Die getroffenen Beschränkungen auf einen einzelnen Einspeisepunkt und einer isolierten Betrachtung auf eine Wirkleistungseinspeisung lassen hierbei jedoch noch keine vollständige Einschätzung der Arbeitspunktabhängigkeit zu.

Die vorliegende Arbeit baut auf die Arbeit des SINTEG-Projektes C/sells [12] auf, in welchem bereits netzseitige Flexibilitätsanforderungen untersucht wurden. Es zeigten sich

im Arbeitspunkt der maximalen Spannungserhöhung geringere Spannungssensitivitäten als in einem Arbeitspunkt mit geringerer Spannung. Die folgenden Untersuchungen sollen herausarbeiten, inwieweit sich diese Erkenntnis im Zuge der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivität auf weitere Last-Szenarien des Versorgungsnetzes übertragen lässt. Zudem wird analysiert, ob und in welchem Maße neben der Spannung als Indikator für den aktuellen Arbeitspunkt auch weitere Variablen einen Einfluss auf die Effektivität eines Flexibilitätseinsatzes haben. Das vorstehende Ziel hierbei ist der möglichst wirtschaftliche Einsatz von Flexibilitäten und somit bei minimalem Einsatz den maximalen Ertrag zu erzielen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der Erläuterung der zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen benötigten Grundlagen erfolgt die Vorstellung des der Arbeit zu Grunde liegenden Testnetzes sowie der Vorgehensweise zur Generierung verschiedener Arbeitspunkte und der Ermittlung der auftretenden Sensitivitätswerte. Hierauf folgt eine Untersuchung der Sensitivität in Arbeitspunkten sowohl bei ausschließlichem Wirkleistungsbezug als auch unter Einbezug eines abweichenden Verschiebungsfaktors. Ausgehend hiervon wird eine Hypothese über die für die wirkleistungsabhängige Spannungssensitivität relevanten Einflussgrößen aufgestellt. Des Weiteren erfolgt eine Darstellung des Sensitivitätsverhaltens bei einer Variation der Spannungssollwertvorgabe am Bilanzknoten. Mithilfe einer Regressionsanalyse wird durch ausgewählte Einflussgrößen eine Nachbildung der Sensitivitätswerte in unterschiedlichen Arbeitspunkten erstellt. Anschließend erfolgt eine Abschätzung der maximalen Abweichungen der Sensitivitätswerte abhängig von den Einflussfaktoren der Spannung und der Wirkleistungsbelastung. Schließlich werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick über die Weiterverwendung der erlangten Erkenntnisse gegeben.

2 Grundlagen zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Im folgenden Abschnitt wird der grundlegende Aufbau elektrischer Energieversorgungsnetzwerke als Verbindung zwischen Einspeisern und Lasten aufgezeigt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf dem durch den Leistungstransport hervorgerufenen Spannungsfall auf den Leitungen. Zudem wird auf die zur Ermittlung des Betriebszustandes des Netzes erforderliche Leistungsflussberechnung eingegangen. Auf diese aufbauend erfolgt eine Erläuterung der Vorgehensweise zur Erstellung von Sensitivitätsanalysen sowie ergänzend eine Darlegung der Struktur von Mittelspannungsnetzen.

2.1 Grundlagen elektrischer Energieversorgungsnetze

Die verbindenden Netzwerke sind geografisch weit ausgedehnt und überwinden dadurch die räumliche Distanz zwischen Erzeugung und Nutzung elektrischer Energie. Bei öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen wird zwischen dem Übertragungsnetz und den Verteilnetzen unterschieden. An das Übertragungsnetz angeschlossen sind große Erzeugungsanlagen wie thermische Kraftwerke, große Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien sowie Wasser- und Pumpspeicherkraftwerke. Von dort ausgehend wird die elektrische Energie über die verschiedenen unterlagerten Netzebenen hinweg bis hin zu den angeschlossenen Lasten weiterverteilt. Dabei findet eine Energieeinspeisung kleinerer Erzeugungsanlagen auch auf den Netzebenen des Verteilnetzes statt. Der Grund, elektrische Leistung über lange Strecken bei einer hohen Spannung zu übertragen, ergibt sich aus der Berechnung der Ohm'schen Verlustleistung $P_v = I^2 \cdot R$. Während eine vorgegebene Wirkleistung $P = U \cdot I$ über die Leitung transportiert werden muss, können die Leitungsverluste durch die Verwendung einer höheren Spannung und somit eines geringeren Stromes deutlich reduziert werden.

Bei den beschriebenen Netzwerken zur öffentlichen Stromversorgung handelt es sich um symmetrische Dreiphasen-Stromsysteme, welche auch als Drehstromsysteme bezeichnet werden. Dreiphasenwechselströme bilden sich aus drei um je $360^\circ/3 = 120^\circ$ zueinander phasenverschobenen sinusförmigen Wechselspannungsquellen mit jeweils gleicher Frequenz von 50 Hz. Damit wird eine deutliche Materialeinsparung gegenüber einer

Ausführung mit alleinstehenden Wechselspannungsquellen erreicht [13]. Je nachdem, ob der Neutalleiter angeschlossen wird, werden hierfür statt sechs Leitern nur drei oder vier Leiter benötigt. Zwischen den Leitern L1, L2 und L3 liegt jeweils die Außenleiterspannung an. Allgemein bezeichnet in der elektrischen Energietechnik die Angabe der Nennspannung U_N eines Netzes stets die Effektivwerte der Außenleiterspannung. In den Außenleitern fließen dementsprechend die belastungsabhängigen Außenleiterströme. Sofern die drei Außenleiterspannungen beziehungsweise die Außenleiterströme zwar um 120° phasenverschoben sind, sich jedoch in ihren Beträgen gleichen, liegt ein symmetrisches Dreiphasen-Stromsystem vor.

Zudem ist ein symmetrischer Netzbetrieb gegeben, wenn sowohl die Speisung des Netzes als auch die Belastung symmetrisch erfolgt. Bei der Summierung der über die drei Phasen übertragenen Wirkleistungen ergibt sich ein zeitlich konstanter Wert. Zusammen mit der in den meisten Fällen vorliegenden Phasenverschiebung des Außenleiterstromes bezüglich der Außenleiterspannung um den Winkel φ ergibt sich die übertragene Leistung zu $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$. Hierbei beschreibt der Verschiebungsfaktor $\cos\varphi = P/S$ das Verhältnis der Wirkleistung zum Betrag der komplexen Scheinleistung. Diese geht wiederum aus der geometrischen Addition der Wirk- und Blindleistung $\underline{S} = P + jQ$ hervor. Die Wirkleistung kann im Gegensatz zur Blindleistung vom Verbraucher in Nutzenergie umgewandelt werden. Die Blindleistung dagegen wird zum Auf- und Abbau von elektromagnetischen Feldern benötigt, wobei auch sie Verluste im Netz hervorruft. Aufgrund der Symmetrieverhältnisse kann das Drehstromsystem in drei gleichwertige Einphasen-Stromsysteme übertragen werden. Somit ist bei einer Auswertung des Netzes nur die Berechnung einer Phase notwendig und der Rechenaufwand wird erheblich verringert. Dieses Vorgehen wird auch als Netzreduktion verstanden und ergibt einphasige Ersatzschaltbilder. Bei den nachfolgenden Betrachtungen und Berechnungen wird das Netz in einem Normalbetriebszustand als stationär beziehungsweise quasistationär angenommen. [1, 13, 14]

Im Hinblick auf das Betriebsverhalten von Leitungen muss zwischen einer elektrisch kurzen und einer elektrisch langen Leitung unterschieden werden. Bei einer Netzfrequenz von 50 Hz und einer Leitungslänge von bis zu 100 km kann vereinfachend eine elektrisch kurze Leitung vorausgesetzt werden. Der ohmsche Ableitungsbelag G' beträgt annähernd null. In einer vereinfachten Betrachtung, welche die Betriebskapazitäten als sehr gering annimmt und diese vernachlässigt, ergibt sich damit aus dem vollständigen π -Ersatzschaltbild ein vereinfachtes Ersatzschaltbild bestehend aus den Längsbelägen (siehe **Abbildung 2.1 a**

und **b**). Hierin vorzufinden sind der ohmsche Widerstand R , beziehungsweise der Widerstand pro Längeneinheit R' , und der induktive Längswiderstand $X' = \omega L'$, welche in Ω/km angegeben werden. Bei einem symmetrisch betriebenen Drehstromnetz der Hoch- und Mittelspannungsebene ist lediglich die einfache Leitungslänge einzusetzen, da in diesen Netzen der Sternpunktleiter in den meisten Fällen entweder nicht mitgeführt wird oder stromlos ist [15]. Durch den Stromfluss von $\underline{I} = \underline{I}_A = \underline{I}_E$ wird der Spannungsfall $\Delta \underline{U} = \underline{U}_A - \underline{U}_E$ verursacht. Vom Betrag des Spannungsfalls $|\Delta \underline{U}|$ zu unterscheiden ist die Spannungsdifferenz $U_{diff} = |\underline{U}_A| - |\underline{U}_E|$, welche die Differenz zwischen den Beträgen der Knotenspannungen am Anfang und am Ende der Leitung beschreibt. Diese stellt auch den technisch relevanten wirksamen Spannungsunterschied dar. [13, 15, 16]

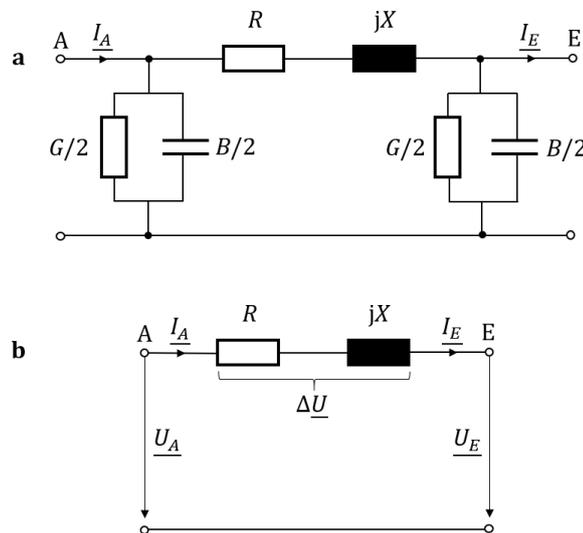


Abbildung 2.1: π -Ersatzschaltbild einer Leitung **(a)**; vereinfachtes Ersatzschaltbild **(b)**

Der Spannungsfall berechnet sich durch den aus Wirk- und Blindleistungsanteilen bestehenden Stromfluss $\underline{I} = I_W - jI_B$ und der Längsimpedanz der Leitung $\underline{Z} = R + jX$. Handelt es sich um eine ohmsch/induktive Last, berechnet sich der komplexe Spannungsfall wie folgt:

$$\Delta \underline{U} = (R + jX)(I_W - jI_B) \quad (2.1)$$

$$\Delta \underline{U} = (I_W R + I_B X) + j(I_W X - I_B R) \quad (2.2)$$

Bezogen auf ein Zeigerdiagramm der Ströme und Spannungen der Leitung definiert der erste Term die Differenz der Längsspannung U_l und der zweite Term die der Querspannung U_q . Im Falle von Mittelspannungsdrehstromkabeln, welche in den folgenden Simulationen dieser Arbeit zum Einsatz kommen, ist für eine hinreichend genaue Betrachtung des Leitungsverhaltens der Aufbau aus Abbildung 2.1 b) nicht ausreichend. Ursache hierfür sind die geringen Leiterabstände, die relativ hohe Kapazitätsbeläge erzeugen. Da es sich um eine elektrisch kurze Leitung handelt, kann jeder Leitungsabschnitt durch ein einzelnes π -Glieder der **Abbildung 2.2** beschrieben werden. [15]

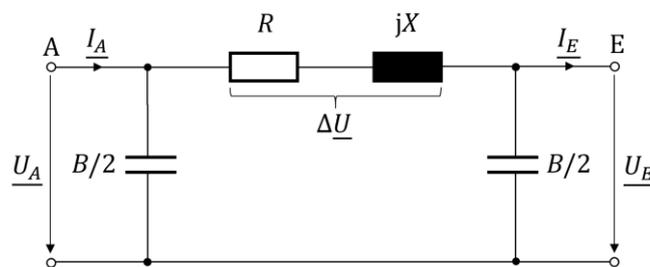


Abbildung 2.2: π -Ersatzschaltbild eines Mittelspannungs-Drehstromkabels

In vielen Fällen sind in elektrischen Energieversorgungsnetzwerken zwar keine direkten Kenntnisse über die auftretenden Ströme vorhanden, jedoch sind häufig die Leistungswerte der Lasten und Einspeiser bekannt oder es liegen Prognosen über diese vor. Somit werden die Spannungen im Netz nicht direkt aus den Strömen bestimmt, sondern in Abhängigkeit der Last-Leistungen berechnet. Hierzu ist die Berechnung der komplexen Scheinleistung aus dem Produkt der komplexen Spannung und des konjugiert komplexen Stromes relevant. Diese Beziehung ergibt sich nach [17] aus den Gleichungen (2.3) und (2.4).

$$\underline{S} = \underline{Z} \cdot I^2 = Z e^{j\varphi} \cdot I^2 \quad (2.3)$$

$$\underline{S} = \frac{U}{I} \cdot I^2 = \frac{U e^{j\varphi_u}}{I e^{j\varphi_i}} \cdot I^2 = U e^{j\varphi_u} \cdot I e^{-j\varphi_i} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* \quad (2.4)$$

Bezogen auf das symmetrische Drehstromsystem und dessen Abbildung auf drei gleichwertige Einphasen-Stromsysteme berechnet sich somit der Stromfluss zu

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{3 \cdot \underline{U}^*} \quad (2.5)$$

Aus Gl. (2.2) und Gl. (2.5) folgt die Berechnung des komplexen Spannungsfalls

$$\underline{\Delta U} = (RP + XQ) \cdot \frac{1}{3U} + j(XP - RQ) \cdot \frac{1}{3U} \quad (2.6)$$

aus der Impedanz der Leitung, der Spannung am Endpunkt $\underline{U} = \underline{U}_E$, welche zur einfacheren Betrachtung in die reelle Achse gelegt wird, und des in diesem Punkt vorliegenden Leistungswertes. Die Spannungen werden häufig anstelle von absoluten Werten als bezogene Größe, auf die jeweilige Nennspannung in p. u. (per unit) normiert, angegeben.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit findet ausschließlich das Verbraucherzählpfeilsystem Anwendung. Dies bedeutet, dass der Leistungsbezug eines Verbrauchers, resultierend aus den Spannungs- und Stromzählpfeilen, als positiv angegeben wird. Analog wird eine Leistungseinspeisung mit einem negativen Vorzeichen gekennzeichnet. Unter Voraussetzung des Verbraucherzählpfeilsystems liegt bei einer Blindleistung mit positivem Vorzeichen induktives sowie bei negativem Vorzeichen kapazitives Verhalten vor [18]. Diese Unterscheidungen werden anhand des P-Q-Diagramms in **Abbildung 2.3** veranschaulicht. Zusätzlich sind dort die Aufteilung der verschiedenen Lastfälle in vier Quadranten (gekennzeichnet durch römische Ziffern) und die $\cos\varphi$ -Werte für alle direkt auf den Achsen gelegenen Fälle dargestellt.

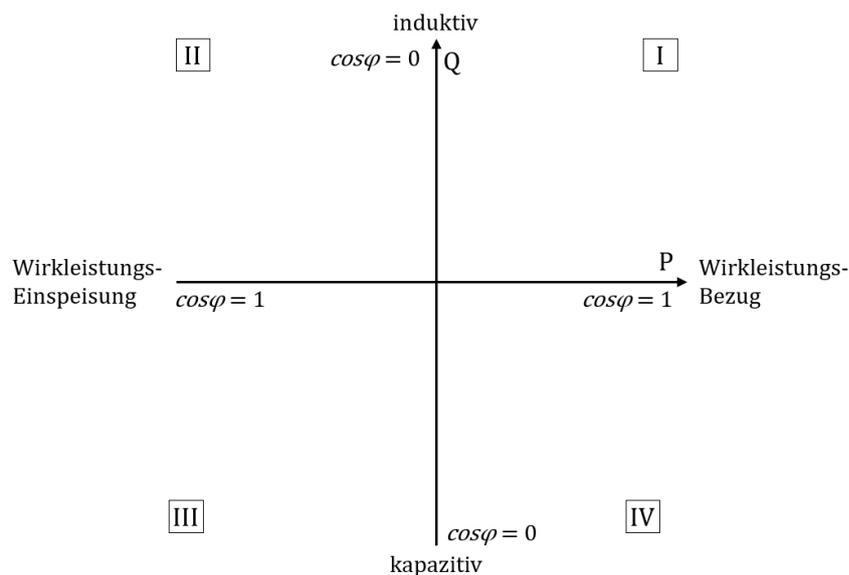


Abbildung 2.3: P-Q-Diagramm im Verbraucherzählpfeilsystem [eigene Darstellung nach 18]

Aus Gl. (2.6) geht hervor, dass neben der Wirkleistung auch die Blindleistung einen direkten Einfluss auf die Spannung im Netz hat. Liegt ein induktives Blindleistungsverhalten vor, wirkt dies spannungssenkend. Gegenüber dem Fall mit einem $\cos\varphi = 1$ ist die Spannung am Endpunkt der Leitung somit geringer. Entsprechend dazu hat ein kapazitives Blindleistungsverhalten eine spannungsanhebende Wirkung.

2.2 Grundlagen der Leistungsflussberechnung

Um aus den gegebenen Daten des elektrischen Energienetzes weitere Kenntnisse über dessen Betriebszustand zu erhalten, werden Leistungsflussberechnungen, auch Lastflussberechnungen genannt, durchgeführt. Hierbei wird ausgehend vom symmetrischen, ungestörten Fall des Netzes dessen quasistationärer Zustand ermittelt. Als Eingabedaten sind hierfür die Topologie des Netzes mit n Knoten und die Admittanzen der Betriebsmittel bekannt. Diese Informationen können gesammelt in der quadratischen $n \times n$ -Knotenpunktadmittanzmatrix \underline{Y} dargestellt werden. In dieser sind, falls vorhanden, die Zweigadmittanzen zwischen den Knoten $i, j = 1, 2, \dots, n$ eingetragen. Auf der Hauptdiagonalen der Matrix befinden sich die negierten Summen der Admittanzen aller Nebenelemente des Knotens der jeweiligen Zeile [14]. Zudem werden drei verschiedene Knotentypen gemäß **Tabelle 2.1** unterschieden. Der Generator-Knoten, welcher den Betrag der Spannung und die Wirkleistung konstant hält, findet in den in dieser Arbeit betrachteten Szenarien keine Anwendung und sei hier lediglich der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Als Slack-Knoten wird derjenige Knoten bezeichnet, der den vorgegebenen Betrag der Spannung über eine Spannungsregelung konstant hält. Um eine eindeutige Lösung der Lastflussrechnung zu erhalten muss dieser einen Bezugswinkel für den Spannungswinkel vorgeben. Meist wird hierfür $\delta_S = 0^\circ$ gewählt. Die im Slack-Knoten unbekanntes Größen der eingespeisten Leistungen dienen dem Bilanzausgleich der komplexen Systemverlustleistungen. Diese sind erst nach der erfolgreichen Durchführung der Leistungsflussberechnung bekannt. Der Last-Knoten wird nach den gegebenen Größen auch als PQ-Knoten bezeichnet. Die damit beschriebenen Lasten und Einspeiser werden demnach über ihre komplexe Knotenleistung definiert. Somit werden die gesuchten Größen der Polarkoordinaten der komplexen Knotenspannungen U und δ über die Leistungsflussberechnung bestimmt. [1]

Tabelle 2.1: Unterscheidung der Knotentypen für die Leistungsflussberechnung [nach 13, 16]

Bezeichnung	Gegebene Größen	Gesuchte Größen	Anwendungen
Slack-Knoten (S)	U, δ_s	P, Q	Bezugsknoten
Last-Knoten (L)	P, Q	U, δ	Verbraucherknoten (negativ und positiv)
Generator-Knoten (G)	P, U	δ, Q	Generatoreinspeisungen

Jeder Knoten, ausgenommen der Slack-Knoten, wird somit mit der komplexen Leistung $\underline{S}_i = P_i + jQ_i$ belegt. Daraus ergibt sich in Matrixschreibweise das untenstehende Gleichungssystem [1]:

$$\begin{pmatrix} \underline{S}_1 \\ \vdots \\ \underline{S}_n \end{pmatrix} = 3 \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \underline{U}_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \vdots \\ \underline{I}_n \end{pmatrix}^* \quad (2.7)$$

Mit dem Ausdruck des Vektors der Ströme als Produkt der Knotenpunktadmittanzmatrix und dem Vektor der Knotenspannungen $\underline{i} = \underline{Y} \cdot \underline{u}$ resultiert das der Lastflussrechnung zu Grunde liegende nichtlineare Gleichungssystem [1]:

$$\underline{s} = 3 \cdot \text{diag}(\underline{u}) \cdot \underline{Y}^* \cdot \underline{u}^* \quad (2.8)$$

Aufgrund seiner quadratischen Konvergenz hat sich zu dessen Lösung weitgehend das numerische Newton-Raphson-Verfahren durchgesetzt. Um dieses anzuwenden, muss zunächst das komplexe Gleichungssystem in zwei reelle Gleichungssysteme überführt werden, wofür die Beziehung

$$\underline{U}_i = U_i \cdot e^{j\delta_i} \quad (2.9)$$

genutzt wird. Das so erhaltene nichtlineare aber stetig differenzierbare Gleichungssystem $\underline{f}(\underline{x}) = 0$ wird durch die Entwicklung der Taylor-Reihe und deren Abbruch nach dem ersten Glied dem Prinzip aus Gl. (2.10) folgend linearisiert [1]:

$$\underline{f}(\underline{x}) = \underline{f}(\underline{x}^{(v)}) + \underline{F}(\underline{x}^{(v)}) \cdot \Delta \underline{x}^{(v)} + \dots = 0 \quad (2.10)$$

In diesem Fall wird der Schnittpunkt der Leistung mit den gegebenen Sollwerten $\underline{S}(\underline{U}) = \underline{S}_{geg}$ bestimmt. Die Bestimmung des gesuchten Wertes erfolgt hierbei iterativ und wird über den Iterationszähler ν gekennzeichnet. $\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(\nu)})$ stellt die Funktional- bzw. Jacobi-Matrix dar und enthält die partiellen Ableitungen der Knotenleistungen nach den Unbekannten, in diesem Fall den komplexen Spannungen. Dabei werden die Wirk- und Blindleistungen jeweils nach dem Betrag und dem Winkel der Spannungen abgeleitet. In der folgenden Darstellung des hieraus entstehenden Gleichungssystems wird, um eine bessere Lesbarkeit zu erreichen, der Iterationszähler ν nicht mitgeführt [1]:

$$\begin{pmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ - \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial U_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_n}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} \\ - & - & - & | & - & - & - \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial U_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_n}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ - \\ \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{pmatrix} = \mathbf{F} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta u \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Zu erkennen ist die Aufteilung der Funktionalmatrix in vier Untermatrizen die jeweils die Ableitungen der Wirk- oder Blindleistungen bezüglich des Spannungsbetrags bzw. des Spannungswinkels abbilden. Die Elemente des Vektors der linken Seite von Gl. (2.11) berechnen sich aus der Differenz der Leistungswerte mit den vorgegebenen Werten der Leistung. In jedem Iterationsschritt wird ausgehend von einem Startwert der Spannung (meist der Netznennspannung) ein neuer, verbesserter Spannungswert berechnet, womit jeweils die Funktional-Matrix neu berechnet werden muss. Über die erhaltene Spannung des jeweiligen Iterationsschritts werden wiederum die Leistungswerte ermittelt. Erreichen die Beträge dieser Differenzwerte den zuvor festgelegten Grenzwert ε , ist das Konvergenzkriterium nach $\mu = \nu$ Schritten erfüllt und die Iteration kann abgebrochen werden. Somit ist der Betriebszustand des betrachteten Netzes bestimmt. Aus den hierdurch bekannten komplexen Knotenspannungen lassen sich über die Admittanzmatrix anschließend auch die auftretenden Leistungsflüsse berechnen. [1]

2.3 Mathematische Vorgehensweise der Sensitivitätsanalyse

Für die Anpassung des Leistungsflusses in einem elektrischen Energieversorgungsnetz zur Beherrschung von Engpasssituationen stellt die gezielte Manipulation der Leistungsentnahme oder -einspeisung durch flexible Marktteilnehmer ein mögliches Mittel dar. Um abschätzen zu können, wie stark der Einsatz einer Flexibilität Einfluss auf den Engpass im Netz nimmt, können Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Diese untersuchen ausgehend von einem bestimmten Betriebszustand des Systems, wie sich die Variation ausgewählter Eingangsdaten auf die zu beeinflussenden Größen auswirkt. Somit werden die Abhängigkeiten der Systemvariablen zueinander bestimmt. Theoretisch kann diese Berechnung durch eine wiederholte Leistungsflussberechnung mit verschiedenen Eingangsdaten erfolgen. Dies hätte jedoch einen erheblichen Rechenaufwand zur Folge. Stattdessen wird bei der Sensitivitätsanalyse eine linearisierte Extrapolation um einen Arbeitspunkt herum durchgeführt. Dennoch liegt der Sensitivitätsanalyse in ihrem ersten Schritt eine Leistungsflussberechnung zu Grunde. [1]

Durch diese ist der Arbeitspunkt $\mathbf{x}^{(0)}$ als Ausgangspunkt für die Sensitivitätsanalyse bestimmt. Die Abweichungen der Spannung am Knoten i bei einer Veränderung der Eingangsdaten des PQ-Elements im Knoten j in Gl. (2.14) ergeben sich durch die Invertierung der Funktionalmatrix $\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(0)})$ des Gleichungssystems (2.11) mittels Gl. (2.13):

$$\mathbf{F}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{F})} \begin{pmatrix} \frac{\partial Q_j}{\partial U_i} & -\frac{\partial P_j}{\partial U_i} \\ -\frac{\partial Q_j}{\partial \delta_i} & \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta U_i \end{pmatrix} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta P_j \\ \Delta Q_j \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Mit der Determinante der Funktionalmatrix

$$\det(\mathbf{F}) = \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i} \cdot \frac{\partial Q_j}{\partial U_i} - \frac{\partial P_j}{\partial U_i} \cdot \frac{\partial Q_j}{\partial \delta_i} \quad (2.15)$$

folgt für die Ermittlung der Spannungsdifferenz bei einer Wirkleistungsvariation mit $\Delta Q_j = 0$ die Gl. (2.16) bzw. nach Umformung Gl. (2.17) [19]:

$$\Delta U_i = \frac{-\frac{\partial Q_j}{\partial \delta_i}}{\frac{\partial P_j}{\partial \delta_i} \cdot \frac{\partial Q_j}{\partial U_i} - \frac{\partial P_j}{\partial U_i} \cdot \frac{\partial Q_j}{\partial \delta_i}} \cdot \Delta P_j \quad (2.16)$$

$$\frac{\Delta U_i}{\Delta P_j} = \left[\frac{\partial P_j}{\partial U_i} - \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i} \cdot \frac{\partial Q_j}{\partial U_i} \cdot \left(\frac{\partial Q_j}{\partial \delta_i} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (2.17)$$

Bezogen auf das gesamte System, jedoch ohne Einbezug des Slack-Knotens, ergibt sich die $n \times n$ -Sensitivitätsmatrix \mathbf{S}_{PV} :

$$\mathbf{S}_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta U_1}{\Delta P_1} & \dots & \frac{\Delta U_n}{\Delta P_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta U_1}{\Delta P_n} & \dots & \frac{\Delta U_n}{\Delta P_n} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.4 Aufbau und Struktur von Mittelspannungsnetzen

Wie in **Tabelle 2.2** dargestellt, können sieben Netzebenen unterschieden werden. Diese beinhalten vier Spannungsebenen, wobei im Rahmen dieser Arbeit die Netzebene fünf und somit ein Mittelspannungsnetz untersucht wird.

Tabelle 2.2: Netz- und Spannungsebenen des deutschen Stromnetzes mit Angabe der jeweils geläufigen Außenleiterspannungen [nach 1, 15]

Netzebene	Bezeichnung	Spannungsebene	Außenleiterspannung
1	Übertragungsnetz	Höchstspannung (HöS)	380 kV, 220 kV
2	Transformation HöS/HS		
3	Überregionales Verteilnetz	Hochspannung (HS)	110 kV
4	Transformation HS/MS		
5	Regionales Verteilnetz	Mittelspannung (MS)	20 kV, 10 kV
6	Transformation MS/NS		
7	Lokales Verteilnetz	Niederspannung (NS)	400 V

Über einen Leistungstransformator im Umspannwerk wird Energie aus dem vorgelagerten Hochspannungsnetz in das Mittelspannungsnetz eingespeist. Hiervon ausgehend werden Industrieanlagen, große Einzelverbraucher, sowie Ortsnetzstationen als Verbindung an die

Niederspannungsebene versorgt. Zudem wird ein großer Teil der regenerativen Erzeugungskapazität an die Netzebene fünf angeschlossen. Ein geläufiger Aufbau des Netzes besteht aus einzelnen Ringnetzen, die durch Trennstellen geöffnet werden können. Diese werden im Normalfall offen als Strahlennetz mit einzelnen Sticheleitungen betrieben. [1, 15]

3 Untersuchung und Auswertung verschiedener Belastungsszenarien

Als Ausgangspunkt für die nachfolgenden Untersuchungen wird ein Testnetz in der Netzberechnungssoftware PowerFactory der Firma DlgSILENT GmbH (Version 2020 SP3) modelliert (siehe **Abbildung 3.1**). Hierbei wird, wie im Mittelspannungsbereich geläufig, ein Ringnetz mit einer offenen Trennstelle ohne die Mitführung des Neutralleiters genutzt. Somit liegt ein einzelner Mittelspannungsstrang vor, wobei die Nennspannung des Netzes 20 kV beträgt. An den Strang angeschlossen befinden sich drei Klemmleisten (KL1 bis 3) von denen aus jeweils ein Mittelspannungsverbraucher versorgt wird. Diese werden aus dem von PowerFactory angebotenen Typ der „Allgemeinen Last“ als symmetrische, dreiphasige Last im Verbraucherzählpeilsystem modelliert. Mit einer negativen Angabe des Leistungsbezugs ist ebenso die Abbildung einer Einspeisung möglich. Gespeist wird der Strang aus dem überlagerten Netz. Dieses Element wird das hier auch als Umspannwerk bezeichnet und ist über die Mittelspannungssammelschiene angeschlossen. Diese bildet somit den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Slack-Knoten, über den ein Spannungswert vorgegeben werden kann. Die Modellierung des Slack-Knotens als konstante Spannungsquelle ist in diesem Fall zulässig, da die realistische Annahme einer zu vernachlässigenden Beeinflussung der vorgelagerten Netzebene durch die an das Mittelspannungsnetz angeschlossenen Einspeiser und Verbraucher getroffen wird. Auch die Spannungsregelung am Umspannwerk trägt hier maßgeblich zu einer konstanten Referenzspannung bei. Den Übertragungsleitungen hinterlegt findet sich ein in Erde verlegtes Drehstromkabel des Leitungstyps N2XSy mit einem Querschnitt von 150 mm². Die Leitungslänge je Abschnitt beträgt 5 km. Damit ist in diesem Fall das Modell einer elektrisch kurzen Leitung aus **Abbildung 2.2** als Berechnungsgrundlage ausreichend. Zu schließen ist dies aus der im Vergleich zur Wellenlänge der Spannung bzw. des Stroms bei der vorliegenden Systemfrequenz deutlich kürzeren Leitungslänge [15, 20].

Zur Untersuchung und Auswertung diverser Belastungsszenarien wird für die entsprechenden Netzzustände eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivitäten zu ermitteln. Die variablen Parameter sind der Wirk- und

Blindleistungsbezug (bzw. Einspeisung) der allgemeinen Lasten an den drei Klemmleisten sowie der Spannungswert des externen Netzes an der Sammelschiene.

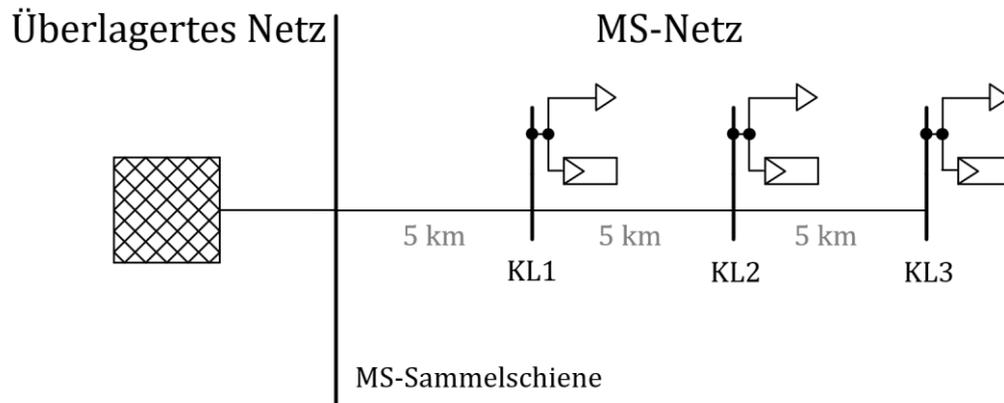


Abbildung 3.1: Darstellung des Testnetzes bestehend aus einem Mittelspannungsstrang

Zur automatisierten Erzeugung der Arbeitspunkte sowie zur Ausführung der jeweils anschließenden Lastflussrechnungen und Sensitivitätsanalysen wird ein Python-Skript (Version 3.8) verwendet. Über dieses kann direkt auf alle Objekte, Attribute und Befehle in PowerFactory zugegriffen werden. Die Vorgehensweise, um die Zugänge auf das Python-PowerFactory-Modul und die PowerFactory-Umgebung zu erhalten, ist in [21] beschrieben. Ein hierzu erstelltes Skript befindet sich in Anhang A.1. Aus den erzeugten Berechnungsergebnissen wird eine tabellarische Datenstruktur erstellt. Nach einer Aufbereitung der Daten stehen diese zur Visualisierung und Auswertung in der Programmier- und Berechnungsumgebung MATLAB der Firma MathWorks (Version R2019b) zur Verfügung.

3.1 Untersuchung von Arbeitspunkten mit ausschließlichem Wirkleistungsfluss an den PQ-Lasten

Die ersten untersuchten Netzzustände befinden sich auf der horizontalen Achse des P-Q-Diagramms aus Abbildung 2.3. Die drei Verbraucher beziehen jeweils ein, zwei oder drei Megawatt, beziehungsweise speisen diesen Wirkleistungsbetrag ein. Pro Arbeitspunkt werden neun verschiedene Sensitivitätswerte berechnet. Diese resultieren aus den drei verschiedenen Einspeiseknoten, welche als Flexibilität genutzt werden können, und wiederum einer Betrachtung der Spannungsänderung an den Klemmleisten eins bis drei (Sensitivitätsknoten). Die sich hieraus ergebenden Sensitivitätswerte finden sich in **Abbildung 3.2** aufgetragen über die Spannung am dritten Knoten (KL3). Die neun

verschiedenen Flexibilitäten der $6^3 = 216$ Arbeitspunkte werden, wie in der Legende aufgeführt, farblich gekennzeichnet. Die Sortierung erfolgt anhand der Höhe des jeweils ersten Datenpunktes. Die erste Ziffer der Beschriftung bezeichnet den Knoten, an dem die Einspeisung variiert wird (dP_{Flex}), entsprechend ist dies der Knoten der Flexibilität. Die zweite Ziffer entspricht dem Knoten, an dem die Sensitivität in p.u./MW berechnet wird (dU_{Knoten}). Diese Bezifferung wird auch im weiteren Verlauf der Arbeit als Identifikation der jeweils betrachteten Sensitivität verwendet. Ergänzend zu Abbildung 3.2 befinden sich in Anhang B.1 **Abbildung B.1** und **Abbildung B.2**, welche die Sensitivitätsverläufe aufgetragen über die Spannungen U_1 und U_2 zeigen.

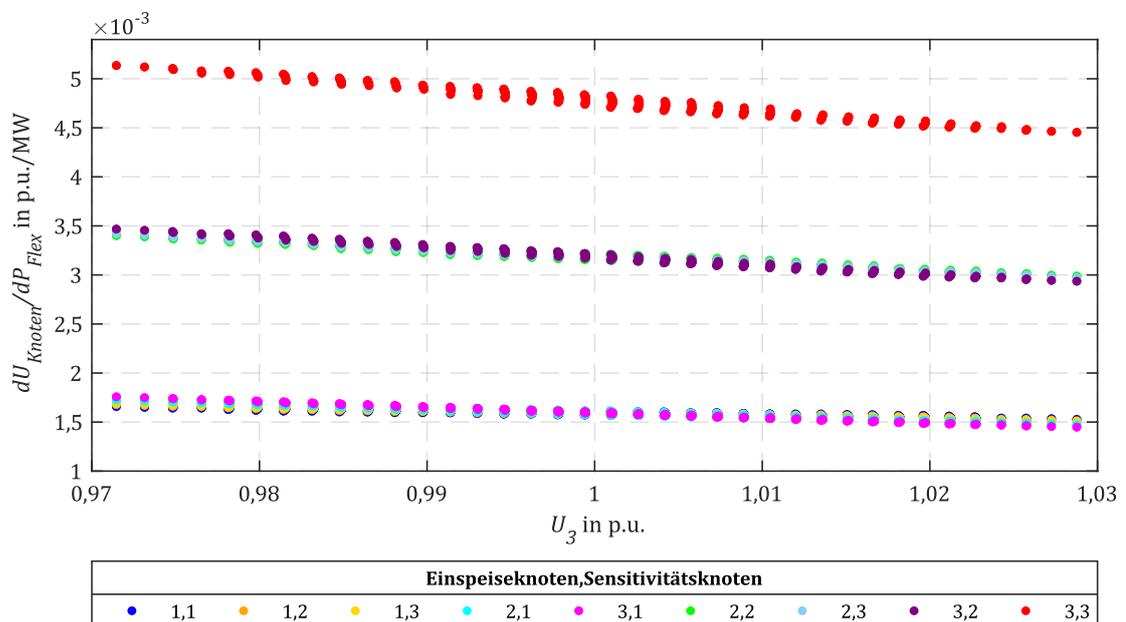


Abbildung 3.2: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL3

3.1.1 Vergleich der auf verschiedene Knoten bezogenen Sensitivitäten

In Abbildung 3.2 deutlich zu erkennen sind die drei verschiedenen Stufen, in die sich die Sensitivitätswerte aufteilen. Die niedrigsten Werte nehmen die Sensitivitäten '1,1', '1,2', '1,3', '2,1' und '3,1' an. Sie befinden sich in einer Spanne von ca. $1,45 \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}}$ bis $1,76 \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}}$ und werden in den ersten fünf Legendeneinträgen definiert. Auf mittlerem Niveau finden sich die Werte der Datenreihen '2,2', '2,3' und '3,2' wieder (ca. $2,94 \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}}$ bis $3,47 \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}}$) sowie auf maximalem Sensitivitätsniveau (ca. $4,45 \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}}$ bis $5,14 \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}}$) die Datenreihe '3,3'. Somit erschließt sich die stärkste Abhängigkeit der

Sensitivität, gekennzeichnet durch die drei verschiedenen Sensitivitätsniveaus aus dem in der Berechnung miteinbezogenen Knoten mit dem geringsten Abstand zum Slack-Knoten. Die Sensitivitäten können demnach durch die niedrigste Knotennummer in ihrer Bezeichnung 'x,x' der entsprechenden Lage in Abbildung 3.2 zugeordnet werden. Dies erklärt sich zum einen aus der Länge des Streckenabschnitts, auf dem die Veränderung der Leistung einen veränderten Spannungsfall hervorruft. Zum anderen ist die Lage des berechneten Knotens entscheidend. Lediglich bis zu diesem Knoten fließt der Spannungsfall mit in die Berechnung ein.

Ferner zeigt sich eine Erhöhung im Zusammenhang mit einer verringerten Spannung U_3 . Am deutlichsten ist dieser Effekt am Verlauf der Sensitivität am Knoten drei bei einer Veränderung der Einspeiseleistung ebenfalls am Knoten drei zu erkennen. Dabei treten die maximalen Sensitivitätswerte jeweils gemeinsam mit der minimalen Spannung U_3 auf und somit in diesem Fall mit der maximalen Wirkleistungsentnahme im Netzstrang. Dementsprechend nimmt die Sensitivität ihren geringsten Wert bei maximaler Spannung und maximaler Wirkleistungseinspeisung an. Die Arbeitspunkte der maximalen Einspeisung und der maximalen Last markieren somit den Worst-Case bzw. Best-Case der Spannungs-sensitivität. Die zugehörigen Zahlenwerte sind in (3.1) und (3.2) mithilfe der Matrixschreibweise aus (2.18) aufgeführt:

$$\text{Best-Case: } \mathbf{S}_{PV} = \begin{bmatrix} 1,6595 & 1,6773 & 1,6861 \\ 1,7241 & 3,4015 & 3,4193 \\ 1,7568 & 3,4668 & 5,1352 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}} \quad (3.1)$$

$$\text{Worst-Case: } \mathbf{S}_{PV} = \begin{bmatrix} 1,5268 & 1,5139 & 1,5074 \\ 1,4750 & 2,9875 & 2,9746 \\ 1,4495 & 2,9363 & 4,4538 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}} \quad (3.2)$$

Die Eintragungen in einer Zeile weisen hierbei jeweils den gleichen Flexibilitätsknoten und die Eintragungen in einer Spalte den gleichen Sensitivitätsknoten auf. Es zeigen sich deutliche Unterschiede in der arbeitspunktabhängigen Sensitivitätssteigerung je nach Ort der betrachteten Spannungsänderung und des Flexibilitätseinsatzes. In absoluten Zahlen ist der Anstieg innerhalb der '3,3'-Datenreihe am größten. Relativ zu ihrem Mittelwert betrachtet steigt jedoch die Sensitivität am ersten Knoten am stärksten an, wenn die Einspeiseleistung an KL3 variiert wird ('3,1'). Die geringsten Veränderungen über alle Arbeitspunkte hinweg, sowohl absolut als auch relativ, ergeben sich für den Fall '1,1'. Deutlich zu erkennen sind die unterschiedlichen Steigungen in **Abbildung 3.3**. Diese zeigt einen Auszug der Abbildung 3.2 mit einem verringerten vertikalen Achsenabschnitt.

Die veränderte Steigung der Verläufe mit einem Einsatz der Flexibilität an unterschiedlichen Knoten im Netz lässt sich mit der Länge der Leitung erklären, durch die die Leistung transportiert werden muss. Ist der Flexibilitätsknoten weiter hinten an der Leitung angeschlossen, tritt hierdurch eine größere Veränderung der Leitungsverluste auf. Diese müssen wiederum am Bilanzknoten mehr oder weniger eingespeist bzw. abgenommen werden. Sie erhöhen oder senken somit auch den Stromfluss bis zum Knoten der Sensitivitätsbetrachtung. Aus der sich damit ergebenden erhöhten Spannungsdifferenz leitet sich eine stärker erhöhte oder verringerte Sensitivität ab. Dies resultiert in der in Abbildung 3.3 zu sehenden abweichenden Steigungen der Datenreihen '1,1', '2,1' und '3,1'.

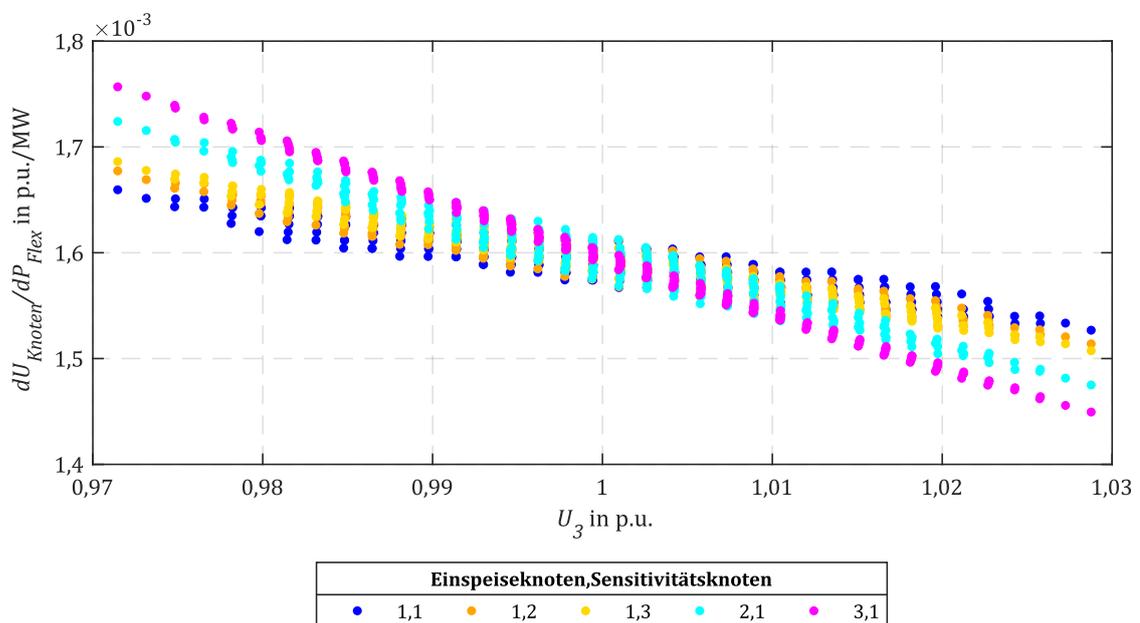


Abbildung 3.3: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL3; niedriges Sensitivitätsniveau

Des Weiteren variieren die Steigungen ebenfalls, wenn die Flexibilität am gleichen Knoten zum Einsatz kommt, jedoch die dadurch hervorgerufene Spannungssensitivität an unterschiedlichen Knoten betrachtet wird. Dies betrifft in diesem Fall die Reihen '1,1', '1,2' und '1,3'. Eine veränderte Leistung am Knoten eins hat einen Einfluss auf den Spannungsfall, der sich auf das gesamte System auswirkt. Durch die erhöhte oder verringerte Spannung verändern sich die Ströme sowohl vor als auch nach dem Flexibilitätsknoten. Je größer der Leitungsabschnitt und somit auch die Impedanz bis zum berechneten Knoten hin ist, desto stärker wirken sich die Ströme auf den bis dort auftretenden Spannungsfall aus. Die Auswirkung auf die Sensitivität verstärkt sich hierdurch und es ergibt sich der steilere Verlauf aus Abbildung 3.3.

Die Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivität ist somit höher, je größer die Entfernung des Einspeiseknotens und die des betrachteten Knotens zum Slack-Knoten ist. Zu beachten ist der größere Einfluss der Lage des Einspeiseknotens ist gegenüber der Lage des Sensitivitätsknotens. Dieses Verhalten ist ebenfalls auf die Sensitivitätsverläufe auf mittlerem Niveau aus Abbildung 3.2 in der **Abbildung B.3** des Anhangs B.1 übertragbar.

3.1.2 Untersuchung von abweichenden Sensitivitätswerten bei konstanter Spannung

In einem Großteil der realen Anwendungsfälle in einem Mittelspannungsnetz stellt die am weitesten vom Slack-Knoten entfernte Klemmleiste den kritischen Knoten dar. Demnach kommt den Sensitivitäts-Fällen '1,3', '2,3' und '3,3' technisch gesehen besondere Bedeutung zu. Dabei handelt es sich jeweils um eine Spannungsänderung im hintersten Knoten des Netzstrangs und einer Wirkleistungsvariation an einem der beiden vorangehenden Netzknoten bzw. ebenfalls am Knoten drei. Vor diesem Hintergrund werden die drei genannten Fälle im Folgenden detaillierter untersucht.

Begonnen mit den Werten der Sensitivität '3,3' zeigt **Abbildung 3.4** diese abhängig von der Spannung an der Klemmleiste drei. Daran ist zu erkennen, dass zwar ein eindeutiger Trend vorliegt, in dem eine erhöhte Sensitivität mit einer verringerten Spannung einhergeht, jedoch diese nicht alleine bestimmend für die Sensitivität ist. Zu schließen ist dies aus den Datenpunkten, in denen eine annähernd konstante Spannung U_3 vorliegt, die Sensitivitätswerte aber dennoch deutlich voneinander abweichen.

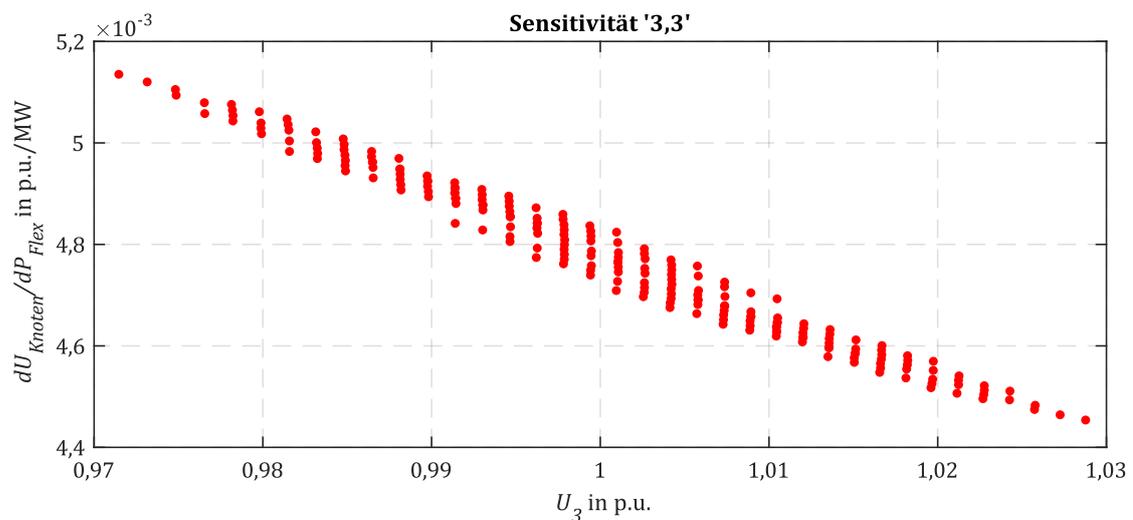


Abbildung 3.4: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3

Für eine genauere Betrachtung dieses Verhaltens wird ein Ausschnitt der Abbildung 3.4 mit nahezu konstanter Spannung gewählt (**Abbildung 3.5 a**). Zur besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen Sensitivitätswerte werden in den folgenden, analog zu Abbildung 3.5 a erstellten Diagrammen jeweils gleich große Achsenabschnitte verwendet. Überdies findet sich in **Abbildung 3.5 b** eine Tabelle mit den Betriebspunkten der allgemeinen Lasten sowie die Sensitivität '3,3' des jeweiligen Arbeitspunktes. **Abbildung 3.5 c** zeigt die Spannungsprofile, die durch die betrachteten Lastverteilungen über die vier Klemmleisten hinweg auf der Leitung entstehen. Hierbei erhält der Slack-Knoten die Bezeichnung ‚Klemmleiste 0‘.

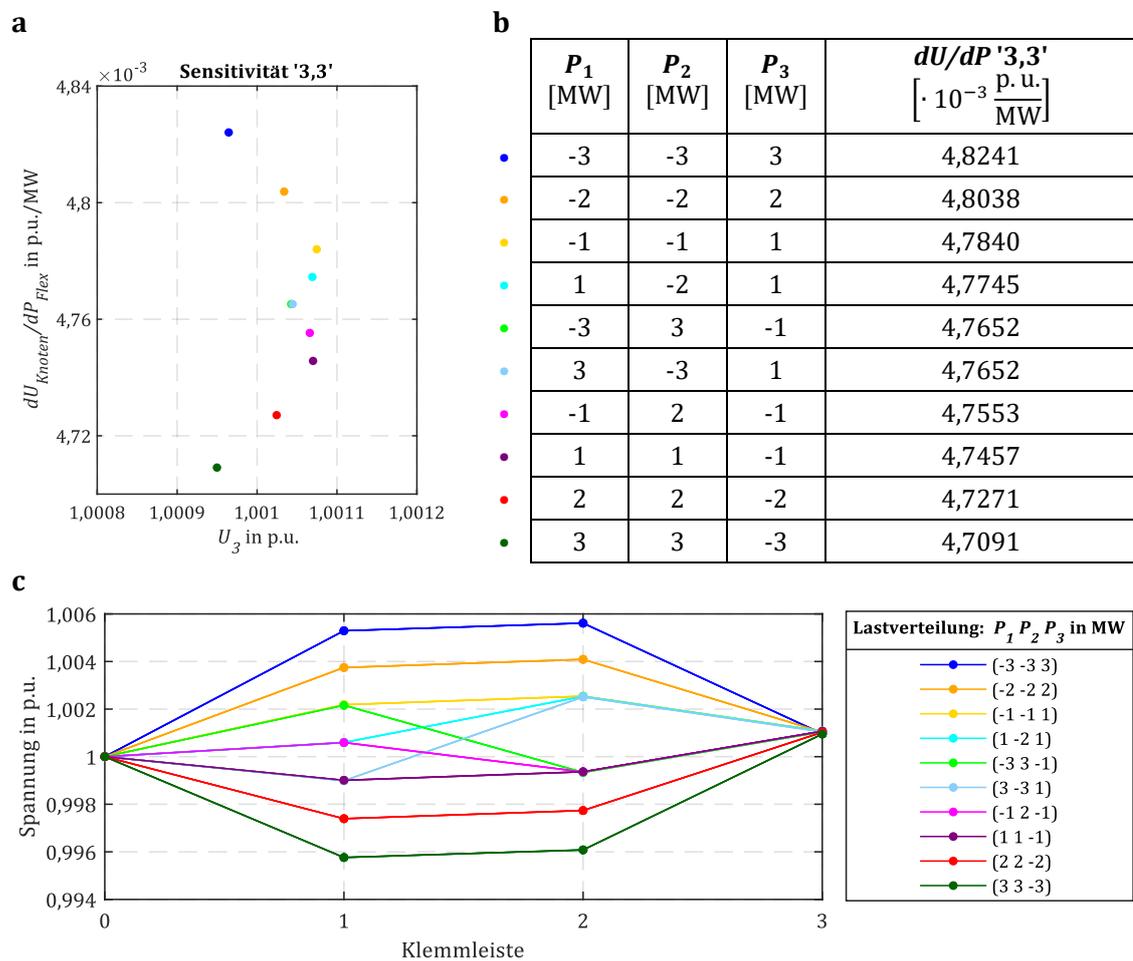


Abbildung 3.5: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3 (**a**);
Tabelle der Betriebspunkte der allgemeinen Lasten mit entsprechender Sensitivität '3,3' in
absteigender Reihenfolge (**b**);
Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen (**c**)

Es zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Sensitivität und dem Spannungsverlauf von KL0 bis KL3: Je höher dessen Kurve verläuft und damit je höher die Spannung von der Sammelschiene bis KL3, desto größer ist trotz gleicher Spannung U_3 deren Sensitivität bezüglich einer Wirkleistungsänderung an KL3. Diese Beobachtung lässt sich gleichermaßen auf die weiteren Abschnitte mit übereinstimmenden Spannungswerten U_3 in Abbildung 3.4 übertragen. Die Verläufe der Spannungskurven werden bei der vorliegenden Betrachtung durch die Wirkleistungseinspeisungen bzw. -bezüge an den Klemmleisten hervorgerufen. Da jeweils die Summen der Spannungsdifferenzen von KL0 bis KL3 übereinstimmen, liegt unter Einbezug der Länge der belasteten Leitungsabschnitte bezüglich des Strangendes stets die gleiche Wirkleistungsbelastung vor. Folglich werden die deutlich voneinander abweichenden Sensitivitätswerte von den veränderten Verteilungen der Lasten hervorgerufen. Aus Abbildung 3.5 b kann demnach abgeleitet werden, dass eine Verlagerung der Last in Richtung des Knotens drei, in diesem Fall sowohl Flexibilitätsknoten als auch Sensitivitätsknoten, eine Erhöhung der Sensitivität zur Folge hat. Die größten Differenzen sowohl zwischen den Spannungsverläufen als auch damit einhergehend zwischen den Sensitivitätswerten finden sich demnach im Beispiel aus Abbildung 3.5 zwischen den Lastverteilungen $P_1 = P_2 = -3 \text{ MW}$ und $P_3 = 3 \text{ MW}$ sowie $P_1 = P_2 = 3 \text{ MW}$ und $P_3 = -3 \text{ MW}$.

Da im beschriebenen Beispiel die Flexibilität und der Sensitivitätsknoten beide an der Klemmleiste drei liegen, ist hier keine Unterscheidung der Einflüsse von Spannung und Lastverteilung auf die beiden Knoten möglich. Um eine differenziertere Betrachtung anstellen zu können, wird im Folgenden die Sensitivität an der Klemmleiste drei bei einem Flexibilitätseinsatz am Knoten zwei analysiert. Somit sind hier zwei unterschiedliche Knoten unmittelbar an der Berechnung beteiligt. Der Verlauf der Sensitivität '2,3' aus Abbildung 3.2 findet sich in **Abbildung 3.6 a** bei einer nahezu konstanten Spannung U_3 sowie in **Abbildung 3.7 a** bei übereinstimmenden Werten von U_2 . Die Spannungen betragen jeweils circa 1,001 p.u.. Die entsprechenden Arbeitspunkte der allgemeinen Lasten und die zugehörigen Sensitivitätswerte sind in der Tabelle des Teils **b** der Abbildungen aufgeführt. Des Weiteren zeigen die Teile **c** der Abbildungen die in den Arbeitspunkten auftretenden Spannungsprofile der Übertragungsleitung. Diese sind für die Abbildung 3.7 zur besseren Lesbarkeit der teilweise überlagerten Verläufe in zwei Diagramme aufgeteilt. Die Spannungsprofile der Abbildung 3.6 c entsprechen der Abbildung 3.5 c.

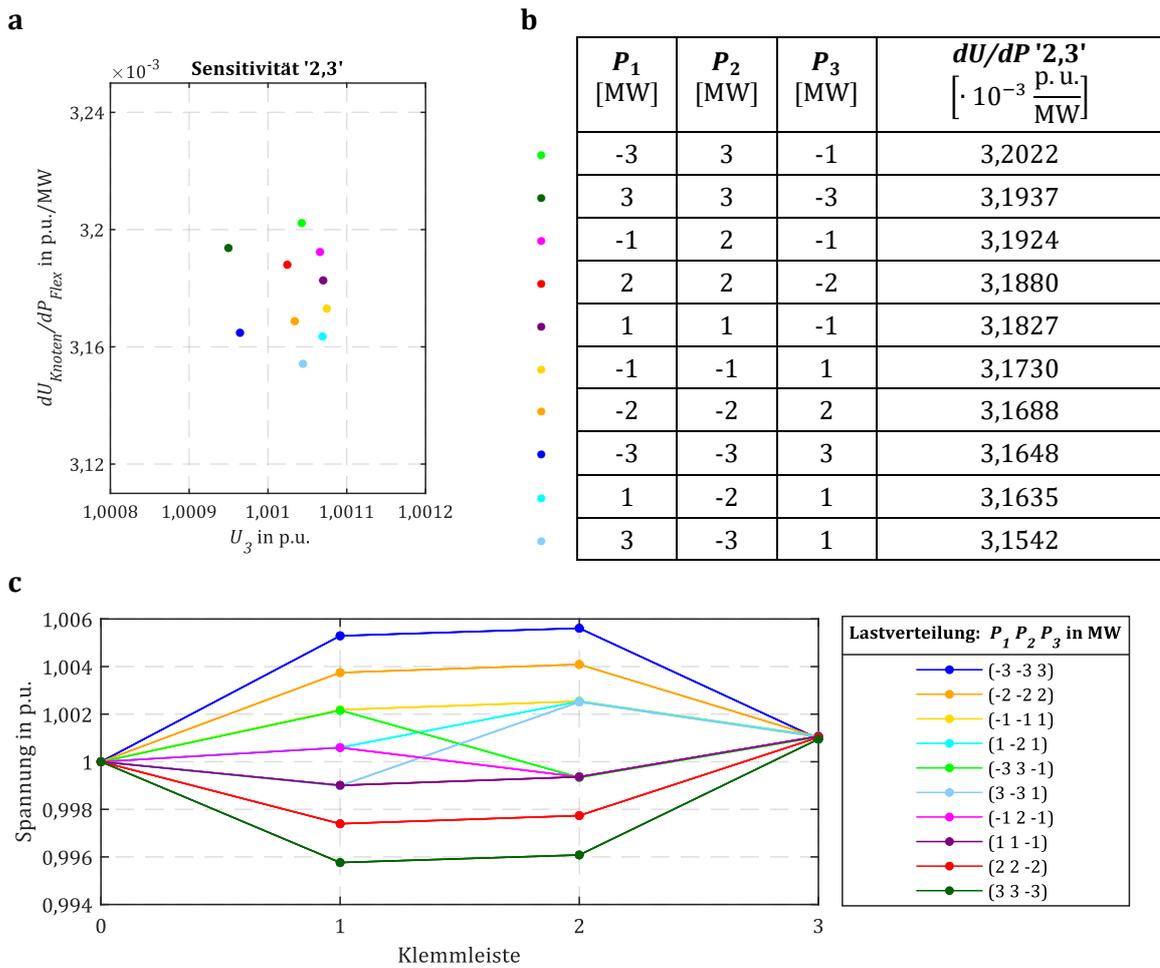


Abbildung 3.6: Sensitivität '2,3' aufgetragen über die Spannung an KL3 **(a)**;
 Tabelle der Betriebspunkte der allgemeinen Lasten mit entsprechender Sensitivität '2,3' in
 absteigender Reihenfolge **(b)**
 Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen **(c)**

Anhand der variablen Sensitivitätswerte bei konstanter Spannung U_3 kann folgende Beobachtung angestellt werden: Die Sensitivität '2,3' ist umso höher, je mehr Last bzw. weniger Einspeisung sowohl ab als auch vor der Klemmleiste zwei (Flexibilitätsknoten) vorhanden ist. Ersteres wirkt sich hierbei stärker auf die Sensitivität aus. Ein direkter Einfluss der Spannung U_2 ist nicht zu erkennen. Bei einer annähernd konstanter Spannung U_2 zeigt Abbildung 3.7, dass bis auf zwei Ausnahmen die Sensitivität '2,3' höher ist, wenn die Spannung des Sensitivitätsknotens (KL3) niedriger ausfällt. Die beiden Ausnahmen stellen die in Gelb und Grün aufgetragenen Fälle dar. Die ab dem Flexibilitätsknoten (KL2) anliegende Last ist jeweils deutlich erhöht gegenüber dem darunterliegenden Fall mit geringerer Sensitivität.

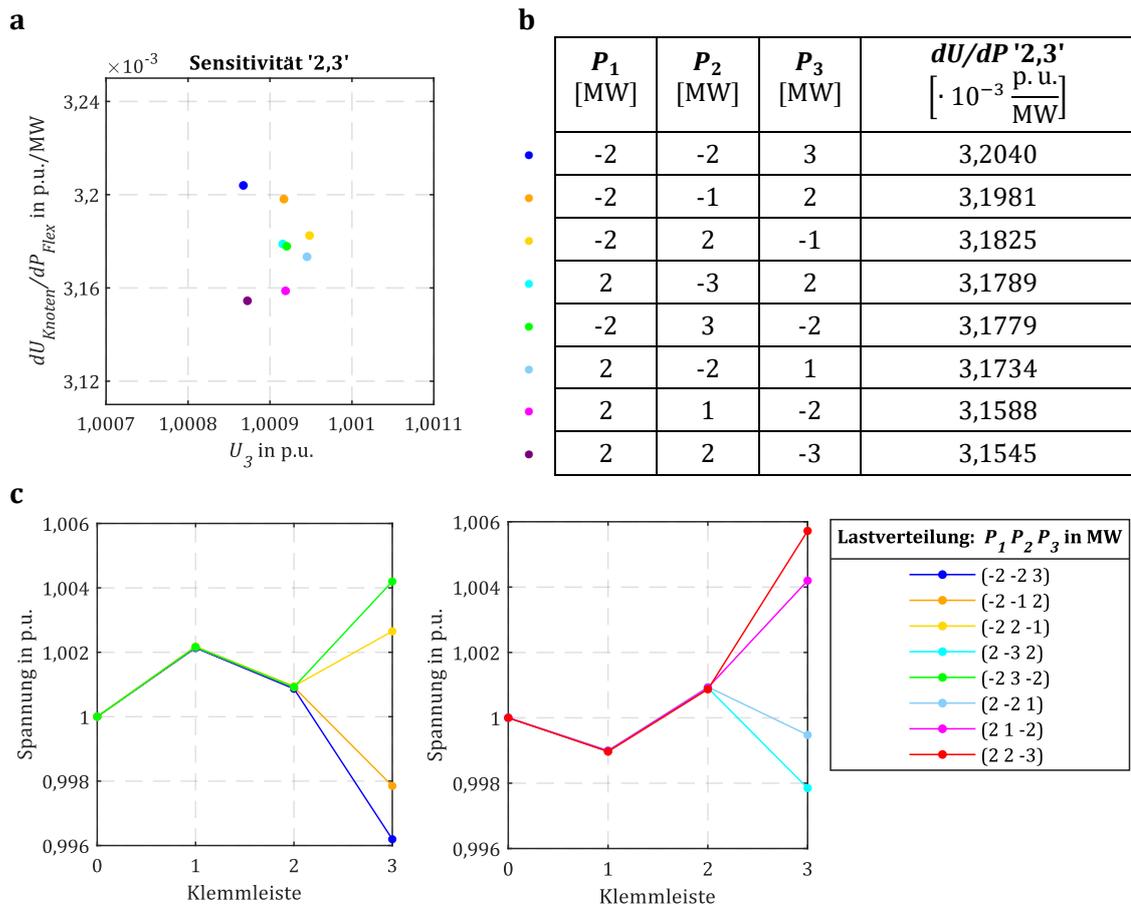


Abbildung 3.7: Sensitivität '2,3' aufgetragen über die Spannung an KL2 (a);
Tabelle der Betriebspunkte der allgemeinen Lasten mit entsprechender Sensitivität '2,3' in
absteigender Reihenfolge (b);
Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen (c)

Bei Betrachtung der Sensitivität '1,3' ist ein direkter Zusammenhang mit den Spannungen U_1 und U_3 erkennbar. Das bedeutet, bei konstanter Spannung an KL3 (**Abbildung 3.8**) ist ausschließlich die Spannung U_1 entscheidend für die Höhe der Sensitivität. Dabei gilt, je geringer U_1 , desto höher ist die Sensitivität, wobei beachtet werden muss, dass sich in diesem Fall U_1 direkt proportional zur Gesamtlast verhält. **Abbildung 3.9 a** visualisiert die Sensitivitätswerte '1,3' bei gleichbleibender Spannung U_1 . Hierbei liegen jeweils zwei Datenpunkte annähernd deckungsgleich aufeinander. Diese weisen die gleiche Farbgebung auf. Ferner finden sich im Teil **b** Spannungsprofile des Netzstrangs, gekennzeichnet durch die entsprechenden Farben. Da hier eine größere Anzahl an Datenpunkten vorliegt, wird zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit nur eine exemplarische Auswahl verwendet. Die Arbeitspunkte, welche nahezu identische Sensitivitäten aufweisen, besitzen jeweils die gleichen Werte von U_1 und U_3 . Der Verlauf der Spannung zwischen der ersten und der dritten Klemmleiste und demzufolge nach dem Einspeiseknoten ist nicht von Bedeutung.

Damit zeigt sich, dass die Sensitivität '1,3' ausschließlich von der Spannung am Sensitivitätsknoten sowie der Summe der Wirkleistung ab dem Flexibilitätsknoten abhängig ist.

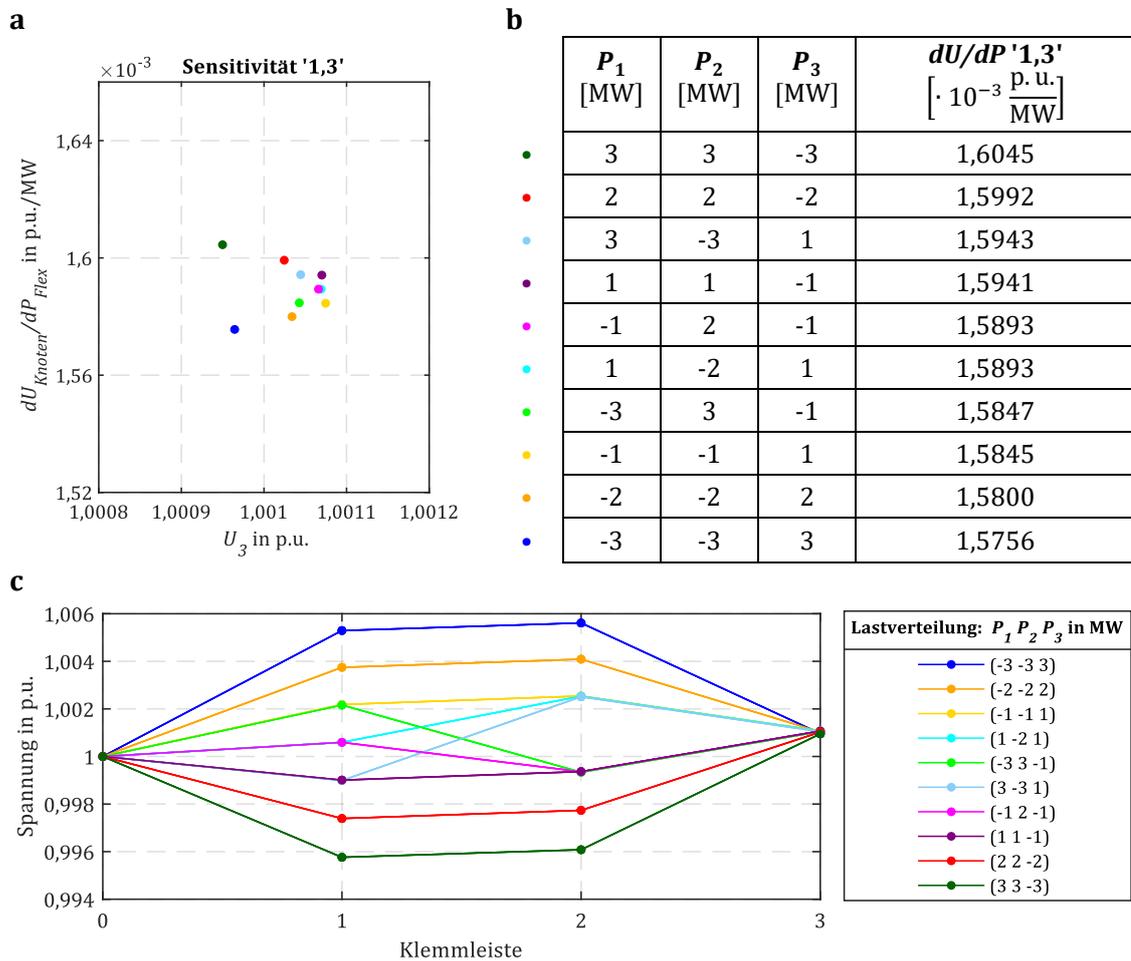


Abbildung 3.8: Sensitivität '1,3' aufgetragen über die Spannung an KL3 **(a)**;
Tabelle der Betriebspunkte der allgemeinen Lasten mit entsprechender Sensitivität '1,3' in
absteigender Reihenfolge **(b)**
Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen **(c)**

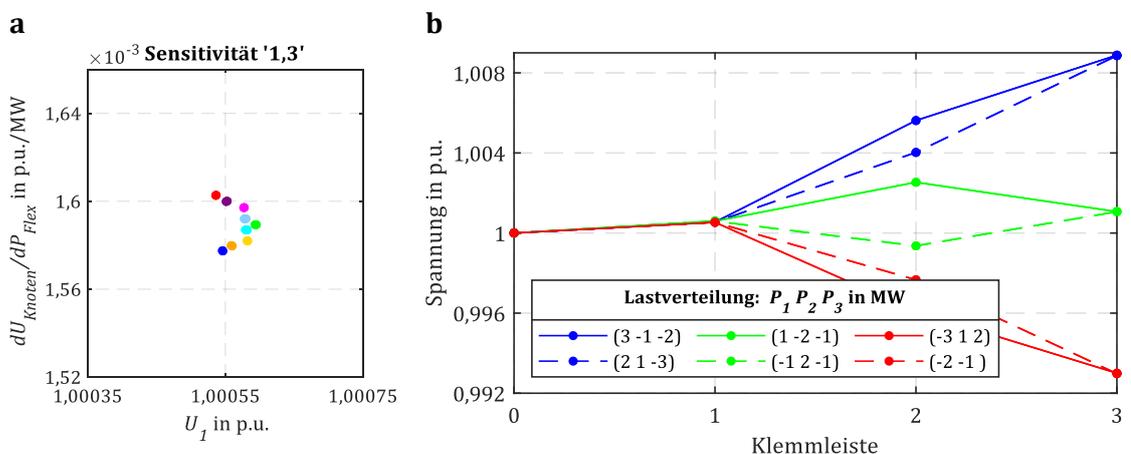


Abbildung 3.9: Sensitivität '1,3' aufgetragen über die Spannung an KL1 **(a)**;
ausgewählte Spannungsprofile des Mittelspannungsstrangs bei verschiedenen Lastverteilungen **(b)**

3.1.3 Formulierung einer Hypothese zur Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungs-Wirkleistungssensitivität

Auf Basis der vorhergehenden Untersuchungen kann somit die der Arbeit zugrunde liegende Beobachtung einer verringerten Spannungssensitivität in einem Arbeitspunkt mit erhöhter Spannung aus Kapitel 1.3 bestätigt werden. Es wird zusammenfassend eine erweiterte Hypothese über die für die wirkleistungsabhängige Spannungssensitivität relevanten Einflussgrößen aufgestellt:

1. Je niedriger die am Sensitivitätsknoten vorliegende Spannung, desto größer ist die Sensitivität.
2. Je größer die im Verbraucherzählpfeilsystem positiv gezählte Wirkleistungsbelastung der Leitung vom Slack-Knoten bis zum Knoten der Flexibilitätsanwendung und je später auf der Leitung diese stattfindet bzw. je geringer die negative Wirkleistungsbelastung, desto größer ist die Sensitivität.

Damit gilt für zweitens: Eine Verlagerung der Wirkleistungsbelastung hin zum Flexibilitätsknoten bewirkt eine Erhöhung der Sensitivität. Die Leitung bis zum Flexibilitätsknoten ist dabei höchstmöglich belastet, sobald sich die maximale Wirkleistungsbelastung an diesem Knoten oder näher am Strangende befindet. Die Verteilung der Last ab diesem Knoten beeinflusst die Sensitivität durch die leicht variable Verlustleistung nur marginal. Ein zuvor befindlicher Wirkleistungsbezug belastet die Leitung nur teilweise und trägt damit weniger zu einer Erhöhung der Sensitivität bei. Dies gilt dem zweiten Punkt der Hypothese folgend in umgekehrter Betrachtungsweise ebenfalls für eine Wirkleistungseinspeisung. Mithilfe der folgenden Kapitel soll die an diesem Punkt aufgestellte Hypothese überprüft und gegebenenfalls überarbeitet bzw. konkretisiert werden.

3.2 Untersuchung von Arbeitspunkten in allen Quadranten des P-Q-Diagramms

Die zuvor auf die horizontale Achse des P-Q-Diagramms beschränkte Untersuchung wird im Folgenden auf die Quadranten I bis IV ausgeweitet. Hierzu wird bei der Erzeugung der Datenpunkte an den allgemeinen PQ-Lasten zusätzlich zur Variation der Wirkleistung ebenfalls der Verschiebungsfaktor modifiziert. Dieser gibt entweder induktives oder kapazitives Verhalten vor. Die drei Lasten erhalten jeweils den gleichen $\cos\varphi$. **Abbildung 3.10** zeigt exemplarisch die Sensitivität '3,3' in Abhängigkeit der Spannung U_3 . Der

Verschiebungsfaktor der allgemeinen Lasten ist durch farbliche Kennzeichnung ebenfalls dargestellt. Die römischen Ziffern im Diagramm kennzeichnen den Quadranten des P-Q-Diagramms, in dem die Lasten in diesem Punkt arbeiten. Die Quadranten eins und zwei beziehen sich auf die grünen Datenpunkte sowie drei und vier auf die blauen. Die rot markierten Arbeitspunkte befinden sich direkt auf der horizontalen Achse und wiederholen somit einen Teil der Datenpunkte aus Abbildung 3.4. Des Weiteren teilt sich die Darstellung in zwei Hälften auf. Der Lastfall befindet sich auf der linken und der Einspeisefall auf der rechten Seite. Die Darstellung ist beschränkt auf die Arbeitspunkte, in denen jeweils alle drei Lasten dem gleichen Quadranten zuzuordnen sind.

Klar zu erkennen sind die in ihrer Grundform gleichförmigen Verläufe der Datenpunkte mit unterschiedlichem Verschiebungsfaktor im Last- und Einspeisefall. Diese sind im Vergleich zueinander jeweils gestaucht bzw. gestreckt sowie in horizontaler und vertikaler Richtung verschoben. Hierbei kommt zu den in Kapitel 3.1 beschriebenen Effekten ergänzend der Einfluss der zusätzlich im Netzstrang fließenden Blindleistung hinzu. Die Verschiebung resultiert aus der spannungssenkenden Wirkung der Blindleistung bei induktivem Verhalten der allgemeinen Lasten. Dies bewirkt in Abbildung 3.10 eine horizontale Verschiebung nach links. Aus dieser Spannungsabsenkung am Sensitivitätsknoten ergibt sich wiederum die zu beobachtende vertikale Verschiebung nach oben, welche die Erhöhung der Sensitivität abbildet. Umgekehrt gilt dies auch für kapazitives Verhalten.

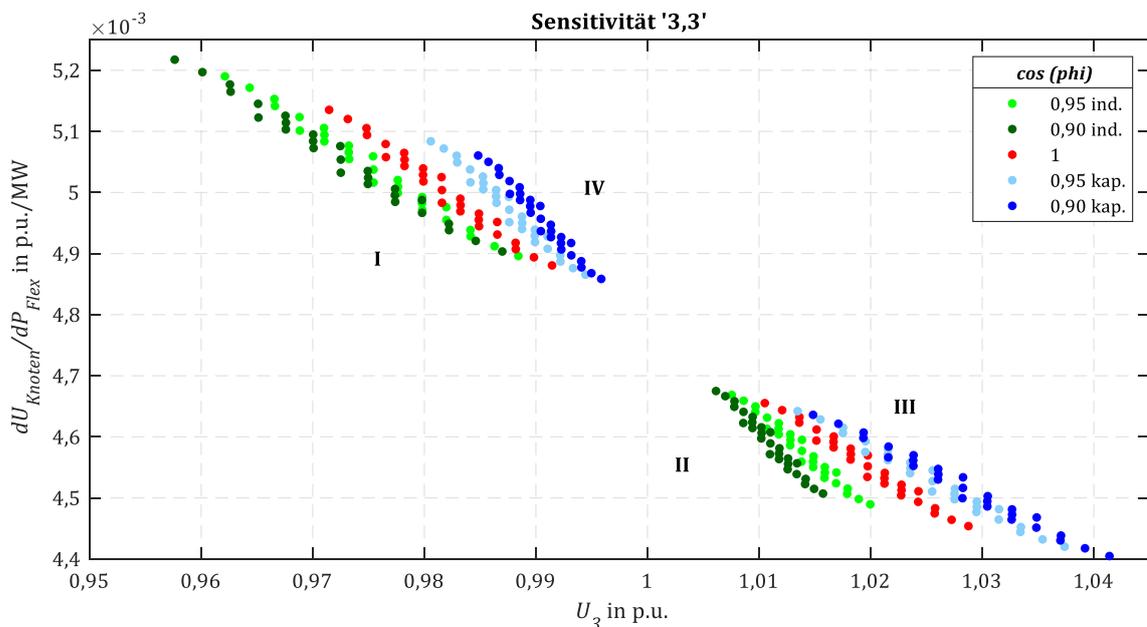


Abbildung 3.10: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3; aufgeteilt in vier Quadranten; Last- und Einspeisefall

Die Streckung der Datenverläufe kann am Beispiel des ersten Quadranten verglichen mit dem Lastfall auf der horizontalen Achse des P-Q-Diagramms erläutert werden. Entscheidend ist hierfür die Formel zur Berechnung des Verschiebungsfaktors und der sich daraus ergebenden Blindleistung:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (3.3)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{\left(\frac{P}{\cos\varphi}\right)^2 - P^2} \quad (3.4)$$

Demzufolge ist die Blindleistung eine Funktion der Wirkleistung und des Verschiebungsfaktors $\cos\varphi$. Bei gleichbleibender Wirkleistung und einer Verringerung des $\cos\varphi$ steigt der Betrag der Blindleistung. Je geringer der Verschiebungsfaktor, desto stärker fällt diese Steigerung aus. Die spannungssenkende Wirkung und die daraus resultierende Steigerung der Sensitivität wird somit erhöht und der Datenverlauf, der eine Veränderung der Wirkleistung abbildet, gestreckt. Dies gilt ebenfalls für die spannungsanhebende Wirkung des induktiven Verhaltens im Quadranten IV sowie gespiegelt für den Fall einer Einspeisung. Somit bestätigt der Effekt, den die Blindleistung im Netzstrang auf die Sensitivität hat, den ersten Punkt der in Abschnitt 3.1.3 formulierten Hypothese.

3.3 Untersuchungen bei variabler Spannung am Slack-Knoten

Da die Variation der Sollwertspannung des HS/MS-Transformators im Umspannwerk eine gängige Praxis der Spannungsregelung darstellt, wird in diesem Abschnitt der Einfluss verschiedener Spannungswerte am Slack-Knoten des Mittelspannungsnetzstrangs analysiert. Hierzu zeigt **Abbildung 3.11** die entsprechenden Simulationsergebnisse für die Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung U_3 . Die Wirkleistung an den Verbrauchern bzw. Einspeisern beträgt jeweils entweder plus oder minus 3 MW. Der $\cos\varphi$ liegt hier vorerst bei eins. Die farbliche Kennzeichnung der Datenpunkte gibt die jeweilige Spannung am Umspannwerk U_{UW} an, welche sich in sieben gleichmäßigen Schritten zwischen 0,94 und 1,06 p. u. bewegt. Die roten Eintragungen bei $U_{UW} = 1$ p. u. entsprechen demnach den Punkten am linken und rechten Rand der Abbildung 3.4. Es bilden sich zwei annähernd lineare Sensitivitätsverläufe des Lastfalls (oben) sowie des Einspeisefalls (unten) heraus.

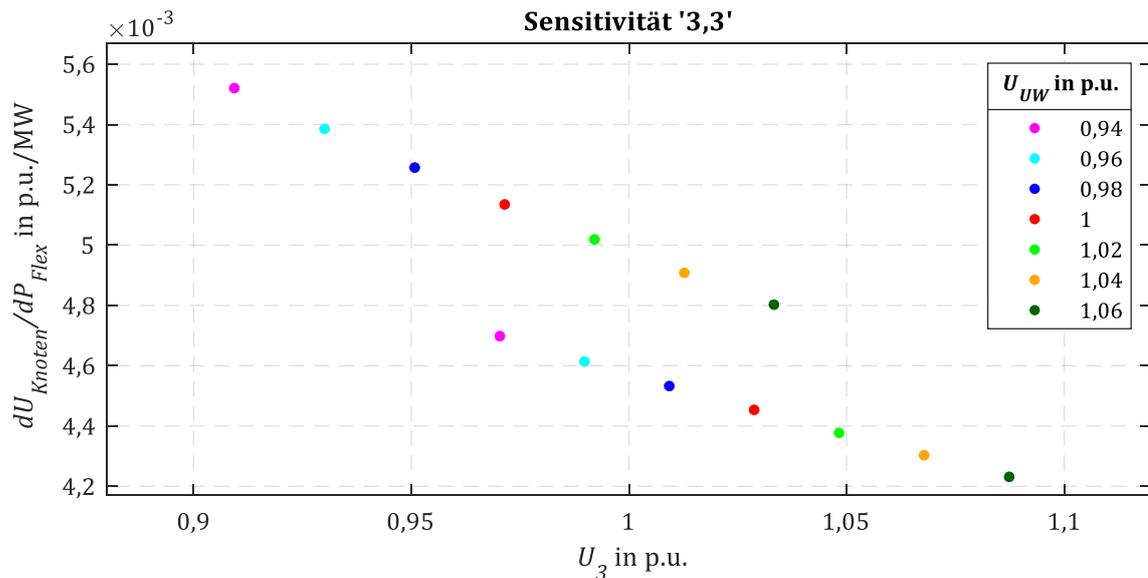


Abbildung 3.11: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3; bei variabler Spannung am Slack-Knoten

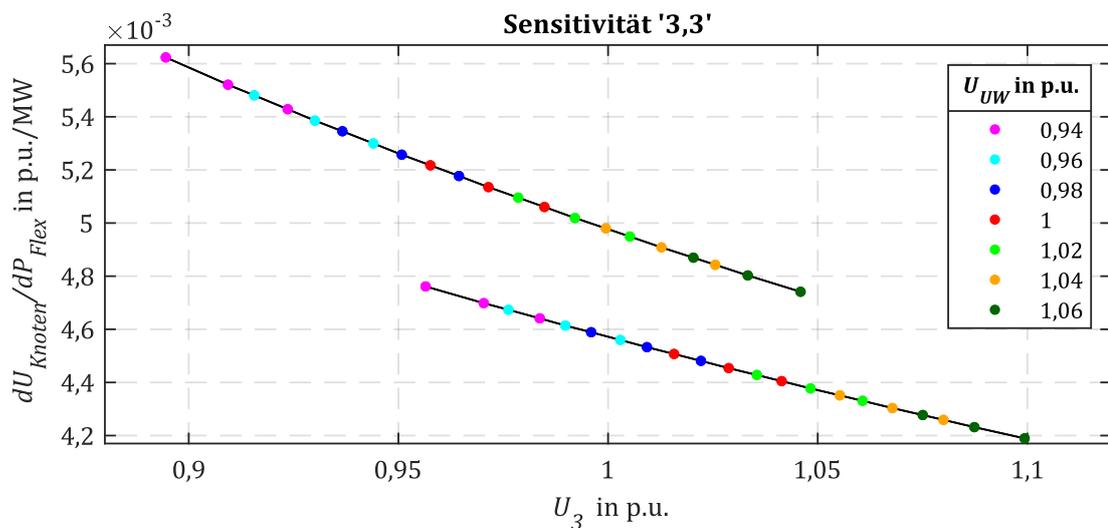
Durch die relativ gleichförmige Steigerung zusammen mit der Last kann auch in dieser Betrachtung die Spannungsabhängigkeit der Sensitivität bestätigt werden. Am Sprung zwischen dem Verlauf der Last und dem der Einspeisung ist zusätzlich erkennbar, dass wiederum nicht alleinig die Spannung entscheidend für die Sensitivität ist, sondern ebenfalls die Höhe der im System vorliegenden Wirkleistung. Dies entspricht dem zweiten Punkt der Hypothese aus Abschnitt 3.1.3. Des Weiteren ist die Varianz der Spannung und somit ebenfalls die der Sensitivität im Falle einer Wirkleistungseinspeisung erkennbar höher. **Tabelle 3.1** zeigt die zugehörigen Zahlenwerte der maximalen Differenzen zwischen den auftretenden Spannungen und Sensitivitäten. Es ist eine deutliche Abweichung der Werte gegeben. Zu erklären ist dieser Effekt mit der größeren Leistung im Lastfall. Hier muss, um die Verbraucher ausreichend versorgen zu können, am Umspannwerk die auf der Leitung auftretende Verlustleistung zusätzlich mit eingespeist werden. Bei negativen Wirkleistungsbezügen an den Klemmleisten erfolgt diese zusätzliche Einspeisung nicht. Es erfolgt lediglich eine um die Verlustleistung reduzierte Rückspeisung in das vorgelagerte Netz. Demzufolge ist der im Netzstrang auftretende Wirkleistungsfluss im Lastfall höher. Folglich ergeben sich sowohl größere Spannungsdifferenzen zwischen den einzelnen Arbeitspunkten aus Abbildung 3.11, als auch die daraus resultierenden größeren Sensitivitätsunterschiede.

Tabelle 3.1: Maximal auftretende Differenzen zwischen den Spannungswerten U_3 sowie den Sensitivitätswerten '3,3'; aufgeteilt in Last- und Einspeisefall

	Maximale Differenz der Spannung U_3 [p. u.]	Maximale Differenz der Sensitivität '3,3' [$\cdot 10^{-3} \frac{\text{p. u.}}{\text{MW}}$]
Lastfall	0,124	0,718
Einspeisefall	0,117	0,467

Abbildung 3.11 wird in **Abbildung 3.12 a** um einen Blindleistungsbezug bzw. eine Blindleistungseinspeisung entsprechend einem $\cos\varphi = 0,90$ erweitert. Durch die spannungsenkende Wirkung bei induktivem Verhalten liegt der zugehörige Datenpunkt jeweils nach links oben versetzt gegenüber dem Basisfall ohne Blindleistungsbezug. Dementsprechend findet bei kapazitivem Verhalten eine Versetzung nach rechts unten statt. Auch in dieser Darstellung können alle Datenpunkte des Last- oder Einspeisefalls durch eine durchgängige Linie verbunden werden. Diese ist hier ergänzend in schwarz mitgezeichnet. Es ist zu erkennen, dass die Linie keinen linearen Verlauf aufweist, sondern nach rechts unten hin leicht abflacht. Durch Modellformulierungen mithilfe von zwei Polynomen ersten Grades in Abhängigkeit der Spannung $p_L(U_3)$ und $p_E(U_3)$ wird zusätzlich das nicht-lineare Verhalten belegt. Die Polynome für den Last- und Einspeisefall sind zusammen mit den zugehörigen approximierten Kurvenverläufen in **Abbildung 3.12 b** dargestellt. Diese können nicht mehr alle Datenpunkte vollständig miteinander verbinden.

a



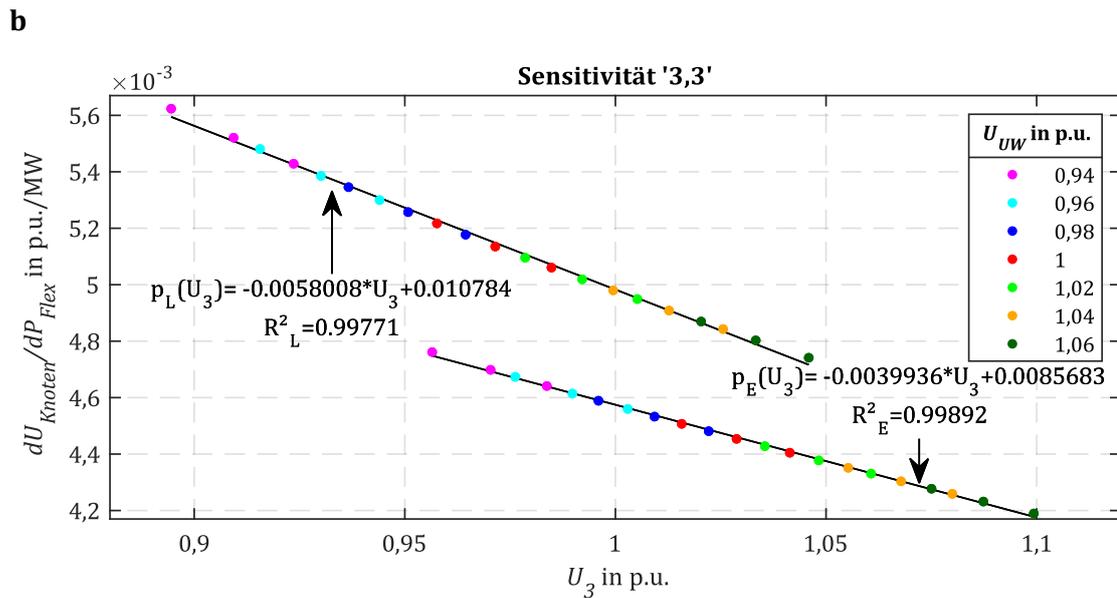


Abbildung 3.12: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3; bei variabler Spannung am Slack-Knoten und variablem $\cos\varphi$ der PQ-Lasten **(a)**; mit Anpassung eines Polynoms 1. Ordnung **(b)**

Das nahe an eins gelegene Bestimmtheitsmaß R^2 zeigt zwar eine sehr gute Näherung durch das Modell, jedoch keine uneingeschränkte Übereinstimmung. Der Grund für die Abflachung des Verlaufs ist die am Slack-Knoten höher vorgegebene Spannung, welche eine allgemeine Spannungsanhebung im gesamten Netzstrang zur Folge hat. Hierdurch kann der Strom für die zu übertragende Leistung geringer ausfallen. Die Leitungsverluste werden reduziert und das System reagiert weniger sensitiv aus Wirkleistungsänderungen. Dieser Effekt ist durch die am Umspannwerk zusätzlich einzuspeisende Verlustleistung im Lastfall deutlich stärker ausgeprägt. Erkennbar ist dies in Abbildung 3.12 b sowohl optisch, als auch durch das niedrigere Bestimmtheitsmaß. Die beiden genannten Effekte der Streckung und der Abflachung der Datenverläufe zeigen sich auch bereits in vorherigen Untersuchungen. Dort sind diese weniger deutlich zu erkennen, können jedoch in den entsprechenden Abbildungen ebenfalls nachvollzogen werden (z. B. in Abbildung 3.4 und Abbildung 3.10).

Aus den bisherigen Betrachtungen des aktuellen Abschnitts kann eine nahezu lineare Abhängigkeit der Sensitivität von der Spannung abgeleitet werden. Es ist jedoch noch keine Aussage dazu möglich, ob hier die Spannung des Flexibilitätsknotens oder des Sensitivitätsknotens ausschlaggebend ist. Aus diesem Grund werden für eine Betrachtung der Sensitivitäten über alle Knoten hinweg, **Abbildung B.4**, **Abbildung B.5** und **Abbildung B.6** des Anhangs B.2 herangezogen. Diese zeigen analog zu Abbildung 3.12 a alle neun Sensitivitäten aufgetragen über die Spannungen U_1 , U_2 und U_3 . Daraus geht hervor, dass der in

Abbildung 3.12 vorliegende annähernd lineare Verlauf nur in den Diagrammen gegeben ist, die in der horizontalen Achse die Spannungswerte des jeweiligen Sensitivitätsknotens führen. Demnach ist bei gleicher Wirkleistungsbelastung des Systems ausschließlich die Spannung des Sensitivitätsknotens entscheidend. Dies deckt sich mit der Hypothese aus Abschnitt 3.1.3.

Um an dieser Stelle zusätzlich einen rechnerischen Beweis der vorrangigen Abhängigkeit von der Spannung des Sensitivitätsknotens zu erhalten, bzw. die rein optisch getroffene Behauptung zu untermauern, werden im Folgenden die Ergebnisse einer linearen Regressionsanalyse dargelegt. Dazu wird, wie bereits für **Abbildung 3.12** b durchgeführt, eine einfache lineare Regression genutzt. Hierbei wird eine Gerade ermittelt, welche die Zielgröße in Abhängigkeit einer ausgewählten Einflussgröße am besten beschreibt, wobei die Minimierung der Abweichungen erreicht wird. Die resultierende Gerade trägt den Namen Regressionsgerade. Um die Güte der Anpassung beziffern zu können wird zusätzlich aus dem Quotienten der erklärten Streuung und der Gesamtstreuung das Bestimmtheitsmaß R^2 bestimmt. Dieses kann sich zwischen den beiden Extremfällen von $R^2 = 0$ und $R^2 = 1$ bewegen. Dabei kennzeichnet zweiteres eine ideale Abbildung der Messwerte durch das Modell. [22, 23]

Die berechneten Bestimmtheitsmaße sind in **Tabelle 3.2** jeweils für die drei Einflussgrößen der Spannungen U_1 , U_2 und U_3 und die Zielgrößen der Sensitivitäten an den Knoten eins bis drei angegeben. Die Flexibilität wird stets an der dritten Klemmleiste eingesetzt. Der höchste, in einer Zeile vorzufindende Wert, bestimmt die Einflussgröße, mit deren Hilfe die gesuchte Sensitivität am treffendsten approximiert werden kann. Diese sind in Tabelle 3.2 rot umrandet und beziehen sich in diesem Fall stets auf die Spannung des Sensitivitätsknotens. Damit ist die eingangs getroffene Annahme bestätigt.

Tabelle 3.2: Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionsanalyse zur Ermittlung der die Sensitivität bestimmenden Knotenspannung

		Einflussgrößen		
		U_1	U_2	U_3
Zielgrößen	Sensitivität '3,1'	0,99728	0,99356	0,98635
	Sensitivität '3,2'	0,98883	0,99765	0,99651
	Sensitivität '3,3'	0,98041	0,99568	0,99771

3.4 Anpassung eines linearen Regressionsmodells

Aufbauend auf die in Kapitel 3.3 beschriebene einfache lineare Regression wird in diesem Abschnitt ein gesamtes Modell zur Beschreibung der Sensitivitätswerte angepasst. Die Sensitivität ist von verschiedenen Einflussgrößen abhängig. Hierbei richtet sich das folgende Vorgehen nach dem Prinzip der schrittweisen Regression aus [23]. Demzufolge wird in einem ersten Schritt für alle Größen einzeln ermittelt, wie signifikant deren Einfluss auf die Zielgröße ist.

Als Datengrundlage für das Modell werden die dem Kapitel 3.2 zugrunde liegenden Simulationsergebnisse verwendet. In diesem Fall entfällt jedoch die Beschränkung auf die Arbeitspunkte, die sich ausschließlich in einem Quadranten bewegen. Folglich werden zusätzlich all jene Arbeitspunkte berücksichtigt, in denen die allgemeinen Lasten in unterschiedlichen Quadranten arbeiten. Die Ergebnisse der einfachen linearen Regression zeigt **Tabelle C.1** im Anhang C. Diese beinhaltet die Bestimmtheitsmaße für alle neun Sensitivitäten abhängig von den Einflussgrößen der Spannungen an den Klemmleisten sowie der Wirk- und Blindleistung der drei PQ-Lasten und dem entsprechenden $\cos\varphi$. Da sich das Bestimmtheitsmaß aus dem Quadrat des Korrelationskoeffizienten berechnet ist die Richtung der Korrelation nicht mehr ablesbar. Aus diesem Grund muss das negative Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten für alle Spannungs- und $\cos\varphi$ -Werte beachtet werden. Die farbliche Kennzeichnung der Werte in Tabelle C.1 visualisiert die Höhe des Bestimmtheitsmaßes. Hierdurch ist deutlich zu erkennen, dass die Blindleistungswerte und der Verschiebungsfaktor keinen relevanten Beitrag zur Erstellung eines Regressionsmodells mit multiplen Einflussgrößen leisten können. Sie sollten demnach nicht in der Umsetzung weiterer Schritte mit aufgenommen werden. Diese niedrigen R^2 Werte erklären sich aus der umfassenden Betrachtung aller Quadranten, die hier vorgenommen wird. Allein das Vorliegen von Informationen zur im Netz vorhandenen Blindleistung bildet noch keinen Anhaltspunkt für die in diesem Arbeitspunkt resultierende Sensitivität. Bei einer gesonderten Betrachtung von Arbeitspunkten aus einem einzelnen Quadranten des P-Q-Diagramms ist dies nicht der Fall. Zudem gibt Tabelle C.1 in den meisten Fällen die drei Spannungswerte als die bedeutendsten Einflussgrößen an. Allgemein kann, falls diese bekannt sind, aus den Spannungswerten am sichersten auf die Sensitivität geschlossen werden. Diese lassen neben der reinen Information über die vorliegende Spannung ebenfalls einen Rückschluss auf die Last und deren Verteilung im Netzstrang zu. **Tabelle 3.3** gibt die Reihenfolge der Einflussgrößen absteigend sortiert nach ihrem Bestimmtheitsmaß bezüglich der neun verschiedenen Sensitivitäten an. Die Zeilen, in denen die Sensitivität

jeweils am gleichen Knoten betrachtet wird, sind zusätzlich eingerahmt. Daraus kann demnach abgelesen werden, anhand welcher Einflussgröße die jeweilige Sensitivität über alle betrachteten Arbeitspunkte hinweg am treffendsten bestimmbar ist

Tabelle 3.3: Einflussgrößen auf die Sensitivitäten absteigend sortiert nach dem Bestimmtheitsmaß der einfachen linearen Regressionsanalyse

Zielgröße	Einflussgrößen					
Sensitivität	nach Bestimmtheitsmaß absteigend sortiert					
'1,1'	U_1	U_2	U_3	P_3	P_2	P_1
'2,1'	U_2	U_3	U_1	P_3	P_2	P_1
'3,1'	U_3	U_2	U_1	P_3	P_2	P_1
'1,2'	U_2	U_1	U_3	P_3	P_2	P_1
'2,2'	U_2	U_3	U_1	P_3	P_2	P_1
'3,2'	U_3	U_2	U_1	P_3	P_2	P_1
'1,3'	U_2	U_3	U_1	P_3	P_2	P_1
'2,3'	U_3	U_2	U_1	P_3	P_2	P_1
'3,3'	U_3	U_2	P_3	U_1	P_2	P_1

Diese Reihenfolge variiert je nach untersuchter Sensitivität. Bei der Sensitivitätsberechnung am ersten Knoten ist jeweils der Knoten der Flexibilitätsanwendung ausschlaggebend. Dabei ist zwar auch die Spannung am Knoten eins wichtig für die Sensitivität. Diese beinhaltet jedoch keinerlei Aussage über die Verteilung der Wirkleistungsbelastung über den Strang hinweg. Sie gibt somit bei einer Flexibilitätsanwendung am Knoten zwei oder drei keinen Aufschluss auf die Wirkleistungsbelastung der Leitung vom Slack-Knoten bis zu diesem Knoten. Da dies jedoch entsprechend des zweiten Punkts der Hypothese aus Kapitel 3.1.3 ebenfalls entscheidend für die Sensitivität ist, ergibt ein lineares Modell basierend auf der Spannung U_2 bzw. U_3 eine bessere Annäherung. Diese Zusammenhänge aus den Einflüssen der Spannung im Sensitivitätsknoten sowie der Spannung in den weiteren Knoten als Abbildung der Wirkleistungsbelastung der Leitung bis hin zum Flexibilitätsknoten ergeben die in Tabelle 3.3 ablesbare Reihenfolge der Bestimmtheitsmaße der Spannungen. Den Spannungswerten nachfolgend führt Tabelle 3.3 die Wirkleistungswerte an den Knoten eins bis drei an. Einzig abweichend hiervon ist der Fall der Sensitivität '3,3', da hier ein höheres Bestimmtheitsmaß für den Wirkleistungswert P_3 vorliegt, als für die Spannung an der Klemmleiste eins. In diesem Falls sagt P_3 mehr über die Spannung am Sensitivitätsknoten sowie der Wirkleistungsbelastung bis zum Flexibilitätsknoten aus, als die Spannung im ersten Knoten. Diese spiegelt lediglich zusätzlich die an der Leitung angeschlossene Gesamtlast wider. Allgemein kann zur Wirkleistung festgehalten werden: Je weiter hinten an der Leitung die Leistung angeschlossen ist, desto größer ist ihr Einfluss

auf jede der im Netz vorliegenden wirkleistungsabhängigen Spannungssensitivitäten. Dies erschließt sich aus der Länge des Leitungsabschnitts, durch welche die bezogene oder eingespeiste Leistung bis zum Bilanzknoten transportiert werden muss. Somit beeinflusst der Anschluss einer Last am Ende der Leitung zusätzlich die Wirkleistungsbelastung aller zuvor liegender Leitungsabschnitte und damit auch die bis zum Leitungsende auftretende Spannung. Hinzu kommt überdies die erhöhte Verlustleistung bei einem weiter vom Slack-Knoten entfernten Anschluss.

Aufbauend auf die Einflussgröße mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß aus der einfachen linearen Regressionsanalyse in Tabelle 3.3 wird im nächsten Schritt ein lineares Regressionsmodell der Zielgrößen (Sensitivitäten dU_{Knoten}/dP_{Flex}) erstellt. Hierbei werden wie in Abschnitt 3.1.2 die Fälle '1,3', '2,3' und '3,3' der Sensitivitäten am Knoten drei modelliert. Nach der Berechnung des Modells anhand der ersten Einflussgröße wird geprüft, welche weitere Einflussgröße bei Aufnahme in das Regressionsmodell die größte Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes des gesamten Modells ergibt. Somit erfolgt dessen Erweiterung um einen zusätzlichen linearen Term. Die das Modell am stärksten korrigierende Größe ist in diesem Fall nicht zwangsläufig die Einflussgröße mit dem zweitgrößten Bestimmtheitsmaß nach Tabelle 3.3. Vielmehr ist hier der Zugewinn an neuen Informationen über den jeweils vorliegenden Arbeitspunkt des Netzes von Bedeutung. Dies zeigt sich auch in **Tabelle 3.4**, die die Einflussgrößen sortiert nach der Aufnahmereihenfolge in das lineare Regressionsmodell angibt.

Tabelle 3.4: Einflussgrößen auf die Sensitivitäten an KL3 sortiert nach der Aufnahmereihenfolge in das lineare Regressionsmodell

Zielgröße	Einflussgrößen					
Sensitivität	nach Aufnahmereihenfolge in das lineare Regressionsmodell sortiert					
'1,3'	U_2	P_1	P_3	P_2	U_3	U_1
'2,3'	U_3	P_3	P_2	P_1	U_2	U_1
'3,3'	U_3	U_1	P_2	P_1	U_2	P_3

Das resultierende Modell besitzt demnach die Form

$$\mathbf{y} = b_0 + b_1 \cdot \mathbf{X}_1 + \dots + b_6 \cdot \mathbf{X}_6, \quad (3.5)$$

mit der Nachbildung des Zielgrößenvektors \mathbf{y} durch den Einflussgrößenvektoren \mathbf{X} sowie den Koeffizienten b . **Tabelle 3.5** gibt das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} des Modells

der multiplen Regression an. Hierbei wird auf das adjustierte Bestimmtheitsmaß zurückgegriffen, um die zunehmende Anzahl der Einflussgrößen und damit die Modellkomplexität zu berücksichtigen. Dabei wird R^2_{adj} gegenüber dem Bestimmtheitsmaß abhängig von der Anzahl der Einflussgrößen reduziert. Die grafischen Nachbildungen der Sensitivitätsverläufe finden sich in **Abbildung C.1**, **Abbildung C.2** und **Abbildung C.3**. Bezogen auf die Sensitivität '3,3' ist in **Abbildung C.3** zu erkennen, dass bereits nach der Hinzunahme des dritten linearen Terms eine in den meisten Punkte sehr treffende Beschreibung der real auftretenden Sensitivität erreicht wird. Dies zeigt auch **Tabelle 3.5**, in der ab der dritten Einflussgröße bereits ein R^2_{adj} -Wert größer 0,99 vorliegt. Ergänzend zu **Tabelle 3.4** und **Tabelle 3.5** sind deren Erweiterungen auf alle neun Sensitivitätswerte in **Anhang C in Tabelle C.2** und **Tabelle C.3** vorzufinden.

Tabelle 3.5: Adjustiertes Bestimmtheitsmaß des Modells der Sensitivitäten an KL3 der multiplen Regression nach Aufnahme je einer zusätzlichen Einflussgröße

Zielgröße						
Sensitivität	adjustiertes Bestimmtheitsmaß des Modells der multiplen Regression					
'1,3'	0,95676	0,96766	0,96777	0,99719	0,99857	0,99857
'2,3'	0,94065	0,96635	0,99449	0,99752	0,99832	0,99832
'3,3'	0,85312	0,98730	0,99688	0,99764	0,99834	0,99833

In der vorausgehenden Betrachtung finden sich neben den Wirkleistungswerten der PQ-Lasten ebenfalls die Spannungen an den Klemmleisten wieder. Da diese jedoch in einem realen Mittelspannungsstrang häufig nicht bekannt sind, ist es in vielen Fälle nötig auf das vorliegende Wissen über die Leistungsübertragung an den Knoten zurückzugreifen. Hierbei ist nach §9 EEG die Ist-Einspeisung von größeren Anlagen an einem Mittelspannungsknoten im Normalfall jederzeit abrufbar. Bei einem Teil der Verbraucher erfolgt nach §55 MsbG eine registrierende Lastgangmessung. Dementsprechend werden im Folgenden die Ergebnisse der schrittweisen Regression unter Ausschluss der Spannungswerte vorgestellt. Das zur Durchführung dieser Regressionsanalyse verwendete Matlab-Skript ist dem **Anhang A.2** zu entnehmen. Als Einflussgrößen mit ausreichend hohem Bestimmtheitsmaß verbleiben aus der einfachen linearen Regression lediglich die bekannten Werte der Wirkleistungen. In diesem Fall werden die Leistungen in allen neun Sensitivitätsfällen in der gleichen Reihenfolge entsprechend ihres Bestimmtheitsmaßes in das Modell aufgenommen: $R^2(P_3) > R^2(P_2) > R^2(P_1)$. Dies ergibt jeweils die stärkste Modellverbesserung. In **Tabelle 3.6** sind die adjustierten Bestimmtheitsmaße für jeden Schritt der Modellentwicklung angegeben. Durch die farbliche Markierung wird die Höhe von R^2_{adj} gekennzeichnet.

Tabelle 3.6: Adjustiertes Bestimmtheitsmaß des Modells der Sensitivitäten der multiplen Regression nach Aufnahme je einer zusätzlichen Einflussgröße

Zielgröße			
Sensitivität	adjustiertes Bestimmtheitsmaß des Modells der multiplen Regression		
'1,1'	0,32793	0,65615	0,98386
'2,1'	0,45420	0,90884	0,99416
'3,1'	0,67013	0,94405	0,99546
'1,2'	0,37974	0,75967	0,96976
'2,2'	0,46452	0,92939	0,98211
'3,2'	0,70228	0,95966	0,98886
'1,3'	0,48441	0,79214	0,96223
'2,3'	0,53917	0,93236	0,97695
'3,3'	0,74898	0,95346	0,98007

Des Weiteren visualisiert **Abbildung 3.13** exemplarisch für die Sensitivität '3,3' die Anpassung des Modells.

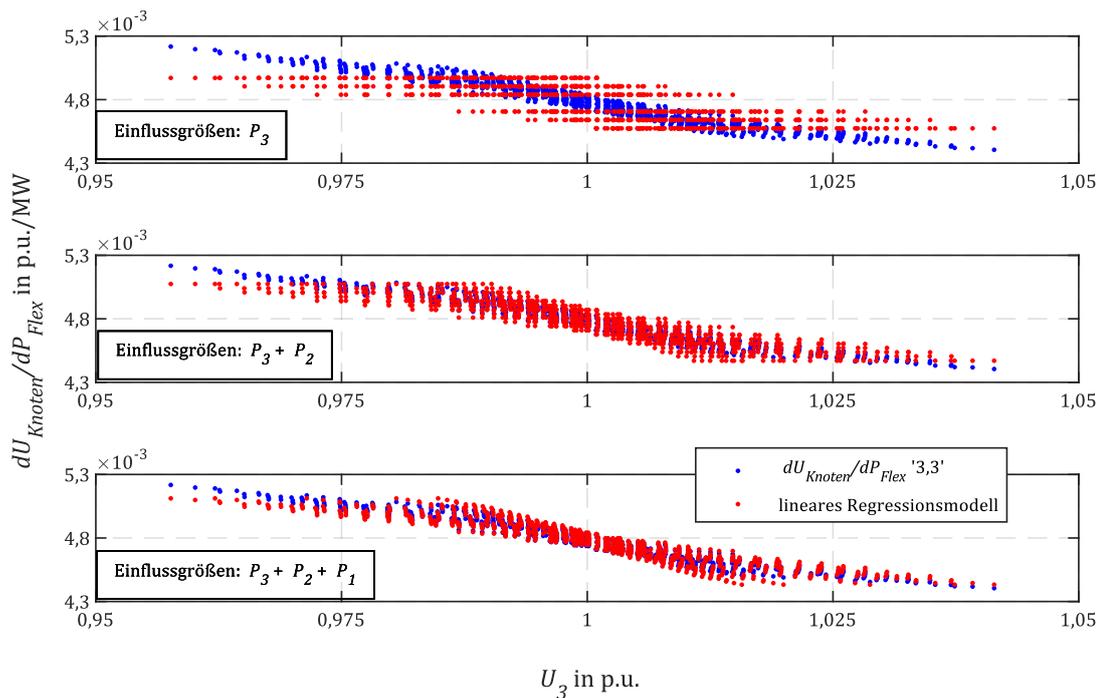


Abbildung 3.13: Schrittweises lineares Regressionsmodell der Zielgröße dU_{Knoten}/dP_{Flex} '3,3' von den Einflussgrößen in der Reihenfolge P_3, P_2, P_1

Aus Tabelle 3.6 ist zu entnehmen, dass bei einer Sensitivität im ersten Knoten eine Näherung mit ausschließlich P_3 zwar noch die schlechteste Anpassung ergibt, sich jedoch bei Beachtung aller drei Wirkleistungswerte das passendste Modell herausbildet. Genau gespiegelt dazu verhalten sich die Modellgenauigkeiten für die Sensitivität im dritten

Knoten. Diese schlechtere Anpassung der letzten drei Fälle ergibt sich aus der stärkeren Abhängigkeit von den die Spannung am Sensitivitätsknoten bildenden Parametern, welche hier nicht Bestandteil des Modells sind. In diesem Fall sind dies die Werte der Blindleistungen bzw. des Verschiebungsfaktors. Innerhalb der Betrachtung eines Sensitivitätsknotens, jedoch unterschiedlicher Flexibilitätsknoten, liegt ein besseres Regressionsmodell vor, wenn die Flexibilität weiter entfernt vom Slack-Knoten eingesetzt wird. Dies entspricht der Reihenfolge der Hinzunahme der Knotenleistungen. Bei einer bekannten Wirkleistung im Knoten drei kann dabei die entsprechende Sensitivität bei einer Wirkleistungsvariation im gleichen Knoten besser abgeschätzt werden, als bei einer Flexibilitätsanwendung an einer anderen Klemmleiste. Nach Aufnahme aller Wirkleistungen in das Modell erklärt dieses jedoch weiterhin die Sensitivitäten besser, wenn der Flexibilitätsknoten weiter hinten an der Leitung liegt. Dies erklärt sich ebenfalls auf Grundlage der Hypothese aus Abschnitt 3.1.3. Bei einem weit hinten liegendem Flexibilitätsknoten ist dessen Effekt bedingt durch die bis dahin vorliegende Leitungsbelastung dominanter (2. Punkt der Hypothese). Somit wird die Sensitivität weniger durch die Spannung im Sensitivitätsknoten bestimmt (1. Punkt der Hypothese), welche hier durch das Fehlen der Blindleistungen im Modell nicht vollständig bekannt ist.

Der Vergleich der Werte aus Tabelle C.2 sowie Tabelle 3.6 zeigt, dass unter Einbezug der Spannungswerte deutlich schneller ein annähernd passendes Modell erreicht werden kann. Nach Hinzunahme der dritten Einflussgröße erreicht die zweite Modellierung bereits annähernd die gleiche Modellgenauigkeit. Hierbei kann die Kombination aus allen drei Wirkleistungen teilweise sogar ein besseres Modell erzeugen, als ein Modell, das zu Beginn aufgrund seines größeren Bestimmtheitsmaßes aus der einfachen linearen Regression auf einen Spannungswert aufbaut. Dies ist bei den ersten vier Sensitivitäten '1,1', '2,1', '3,1' und '1,2' der Fall. Insgesamt kann durch die Kenntnis der Wirkleistungen ein Regressionsmodell mit einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von mindestens 0,95 erreicht werden.

3.5 Worst-Case und Best-Case-Betrachtung

Entsprechend der Hypothese aus Abschnitt 3.1.3 sind folgende Faktoren begünstigend für eine hohe Sensitivität:

1. Niedrige Spannung im Sensitivitätsknoten, durch
 - 1.1. Wirkleistungsbelastung der Leitung
 - 1.2. Induktive Blindleistungsbelastung der Leitung
 - 1.3. Niedrige Referenzspannung am Umspannwerk

2. Hohe Wirkleistungsbelastung der Leitung bis zum Flexibilitätsknoten sowie Verlagerung des Lastschwerpunkts zu diesem Knoten

Bei einer maximalen Ausreizung dieser Faktoren liegt der bestmögliche Fall für einen Flexibilitätseinsatz vor. Anders herum betrachtet bewirkt eine Umkehrung der Einflussgrößen in das gegenüberliegende Extremum die minimale spannungsbeeinflussende Wirkung der Flexibilität. Zur Bezifferung der Divergenz zwischen den beiden Extremfällen wird die Datengrundlage aus Abschnitt 3.2 und 3.4 herangezogen. **Abbildung 3.14** zeigt diese anhand der Sensitivität '3,3', wobei die Datenpunkte der maximalen und minimalen Sensitivität durch Einrahmung hervorgehoben sind.

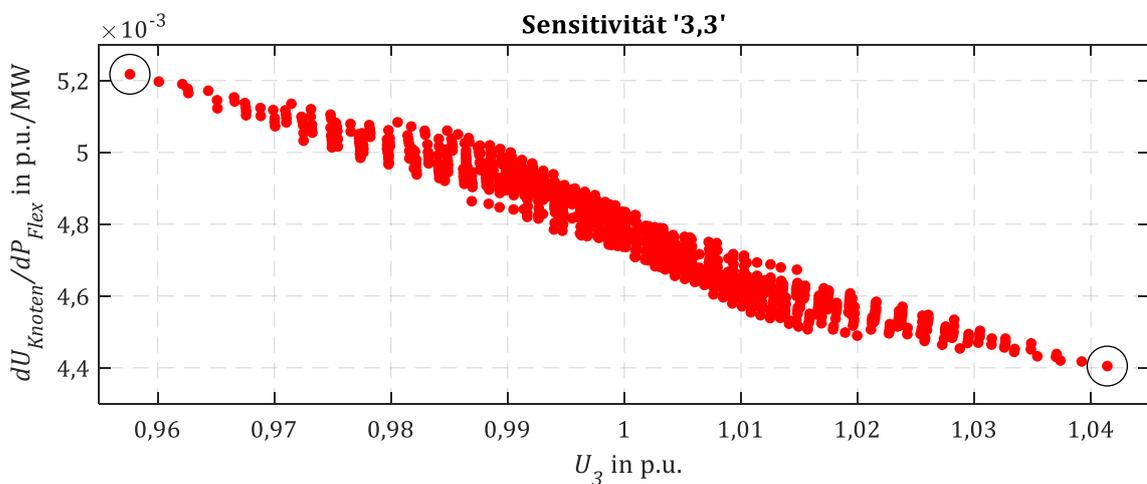


Abbildung 3.14: Sensitivität '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3; Markierung von Best- und Worst-Case

Die markierten Sensitivitätswerte befinden sich dabei in den in **Tabelle 3.7** aufgeführten Arbeitspunkten. Diese weisen den Punkten 1.1. und 1.2. der obigen Aufzählung folgend die Extremwerte der Spannungen auf, bedingt durch eine maximale Last bzw. Einspeisung sowie den minimalen Verschiebungsfaktor jeweils induktiv bzw. kapazitiv.

Tabelle 3.7: Arbeitspunkte des Best- und Worst-Case-Szenarios; bei $U_{UW} = 1$ p. u.

P_1 [MW]	P_2 [MW]	P_3 [MW]	U_1 [p. u.]	U_2 [p. u.]	U_3 [p. u.]	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	$\cos\varphi_3$
3	3	3	0,979	0,965	0,958	0,90 ind.	0,90 ind.	0,90 ind.
-3	-3	-3	1,021	1,035	1,041	0,90 kap.	0,90 kap.	0,90 kap.

Die beiden Arbeitspunkte bedingen für jede der weiteren acht Sensitivitäten deren Extrema. Alle hierbei berechneten Sensitivitätswerte sind den Gleichungen (3.6) und (3.7) entsprechend der Matrixschreibweise aus (2.18) zu entnehmen:

$$\text{Best-Case: } \mathbf{S}_{PV} = \begin{bmatrix} 1,6722 & 1,6986 & 1,7119 \\ 1,7396 & 3,4465 & 3,4724 \\ 1,7741 & 3,5154 & 5,2174 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}} \quad (3.6)$$

$$\text{Worst-Case: } \mathbf{S}_{PV} = \begin{bmatrix} 1,5180 & 1,4993 & 1,4899 \\ 1,4681 & 2,9600 & 2,9414 \\ 1,4437 & 2,9109 & 4,4048 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}} \quad (3.7)$$

Zudem zeigt **Tabelle 3.8** die vorliegende prozentuale Abweichung zwischen den Sensitivitätswerten. Diese werden ausgehend vom jeweiligen Maximalwert berechnet und bewegen sich zwischen 9,22 % für die Sensitivität '1,1' und 18,63 % für die Sensitivität '3,1'.

Tabelle 3.8: Abweichung der maximalen und minimalen Sensitivitätswerte; bei $U_{UW} = 1$ p. u.

Maximale Abweichung der Sensitivitäten

'1,1'	'1,2'	'1,3'	'2,1'	'2,2'	'2,3'	'3,1'	'3,2'	'3,3'
9,22 %	11,74 %	12,97 %	15,61 %	14,12 %	15,31 %	18,63 %	17,19 %	15,57 %

In den bisher in diesem Abschnitt betrachteten Arbeitspunkten liegt die Spannungsvorgabe am Slack-Knoten exakt bei der Netznennspannung von 20 kV. Mit der Annahme einer maximalen Spannungsvariation am Umspannwerk von ± 6 % werden die Arbeitspunkte aus Tabelle 3.7 um diese Vorgaben erweitert. Hierdurch werden die Sensitivitäten im Lastfall um durchschnittlich ca. 7,1 % und um ca. 5,2 % im Einspeisefall erhöht bzw. reduziert. Es ergeben sich somit die veränderten Arbeitspunkte aus **Tabelle 3.9** für die maximalen und minimalen Sensitivitätswerte. **Tabelle 3.10** zeigt überdies die maximalen Abweichungen zwischen den einzelnen Sensitivitäten. Diese erhöhen sich deutlich um je ca. 10 % auf bis zu annähernd 30 %. Dieser zusätzliche Einfluss der Spannung am Umspannwerk entspricht dem Punkt 1.3. der eingangs benannten Faktoren.

Tabelle 3.9: Arbeitspunkte des Best- und Worst-Case-Szenarios

P_1 [MW]	P_2 [MW]	P_3 [MW]	U_{UW} [p. u.]	U_1 [p. u.]	U_2 [p. u.]	U_3 [p. u.]	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	$\cos\varphi_3$
3	3	3	0,94	0,917	0,902	0,895	0,90 ind.	0,90 ind.	0,90 ind.
-3	-3	-3	1,06	1,080	1,093	1,099	0,90 kap.	0,90 kap.	0,90 kap.

Tabelle 3.10: Abweichung der maximalen und minimalen Sensitivitätswerte**Maximale Abweichung der Sensitivitäten**

'1,1'	'1,2'	'1,3'	'2,1'	'2,2'	'2,3'	'3,1'	'3,2'	'3,3'
19,71 %	22,00 %	23,13 %	25,50 %	24,17 %	25,26 %	28,24 %	26,96 %	25,50 %

Eine Einschätzung der maximalen durch Lastverteilung hervorgerufenen Differenz der Sensitivität nach Punkt zwei kann mithilfe der Arbeitspunkte des Kapitels 3.1 erfolgen. Hierfür wird erneut exemplarisch die Sensitivität '3,3' herangezogen. Die maximale Abweichung der Sensitivität tritt bei annähernd konstanter Spannung U_3 auf. Die entsprechenden Werte sind bereits in Abbildung 3.5 a und b zu sehen, wobei die Differenz des höchsten und niedrigsten Sensitivitätswertes $0,1151 \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MW}}$ beträgt. Dies entspricht einer Abweichung zwischen den beiden Maximalwerten von 2,39 %.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Umstrukturierung des Stromversorgungssystems weg von einer zentralen Versorgung hin zu einer zunehmend dezentralen und dargebotsabhängigen Versorgungsstruktur stellt insbesondere das Verteilnetz vor neue Herausforderungen. Ein Ansatz, diesen zu begegnen, stellt die Flexibilisierung des Angebots und der Nachfrage elektrischer Energie dar, um Netzengpässe zu vermeiden. Hierbei können wirkleistungsbezogene Flexibilitäten durch ihre spannungsbeeinflussende Wirkung zur Vorbeugung und Behebung von Spannungsbandproblemen eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Spannungssensitivität der Knoten in einem Mittelspannungsnetzstrang gegenüber einer Wirkleistungsänderung. Um Rückschlüsse über deren Arbeitspunktabhängigkeit ziehen zu können, erfolgt eine Untersuchung in verschiedenen Belastungsszenarien eines Netzes, bestehend aus einem Strang mit drei Knoten. An diesen ist jeweils eine Last bzw. Einspeisung angeschlossen. Beginnend mit einer ausschließlich durch Wirkleistung erzeugten Belastung zeigen die Untersuchungsergebnisse die prägnanteste Abhängigkeit von der Lage des Flexibilitätseinsatzes bzw. von der Stelle, an dem die Spannungsmanipulation erreicht werden soll. Dabei ist jeweils der sich am nächsten zum Umspannwerk befindliche Knoten entscheidend für das Niveau der Sensitivität. Zudem ist eine Steigerung der Sensitivität über die Absenkung der Spannung hinweg zu erkennen. Die resultierende Steigung ist zum einen umso steiler, je größer die Entfernung der Flexibilität vom Slack-Knoten ist. Zum anderen erhöht ein längerer Leitungsabschnitt bis zum Sensitivitätsknoten die Steigung. Die Beeinflussung der Steigung durch Ersteres fällt jedoch stärker aus. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivitätswerte in den unterschiedlichen Arbeitspunkten nicht vollständig linear mit der Spannung verlaufen, sondern bei gleichbleibenden Spannungswerten durch verschieden hohe Werte vom linearen Verlauf abweichen. Zur Erklärung dieses Verhaltens werden die Einflussfaktoren, die dies hervorrufen, herausgearbeitet. Hierbei zeigen sich zwei zentrale Abhängigkeiten: Zum Ersten befindet sich die Spannung, welche die Sensitivität direkt beeinflusst, an der Klemmleiste, an der die Spannungsänderung berechnet wird. Zum Zweiten erhöht sich die Sensitivität durch eine gesteigerte Wirkleistungsbelastung der Leitung bis zum Knoten der Flexibilität sowie durch eine Lastverlagerung hin zu diesem Punkt. Die Betrachtung von Arbeitspunkten in allen Quadranten des P-Q-Diagramms zeigt eine durch die spannungsbeeinflussende Wirkung der

Blindleistung hervorgerufene Verschiebung der Sensitivitätsverläufe. Durch die Spannungsabsenkung bei induktiver Blindleistung erhöht sich die Sensitivität. Anders herum betrachtet bewirkt ein kapazitives Verhalten eine Spannungssteigerung und somit eine Verringerung der Sensitivität. Des Weiteren verursacht die Verringerung des Verschiebungsfaktors bei induktivem Verhalten im Lastfall eine Streckung des Sensitivitätsverlaufs über die Spannung. Dies begründet sich aus der Blindleistung als Funktion der Wirkleistung und des Verschiebungsfaktors. Die Spannungsbeeinflussung durch die Wirkleistung fällt bei geringerem Verschiebungsfaktor über die Variation der Wirkleistung der PQ-Lasten hinweg stärker aus. Analog hierzu verhalten sich ebenso die weiteren drei Quadranten. Im Szenario einer variablen Spannungssollwertvorgabe am Bilanzknoten zeigt sich wiederholt die Steigerung der Sensitivität bei verringerter Spannung. Die sich ergebenden Kurvenverläufe steigen leicht an und es stellt sich auch ohne die Variation der Wirkleistungseinspeisungen an den Netzknoten kein exakt linearer Verlauf ein. Hierbei kann bestätigt werden, dass der relevante Knoten für die Spannungsabhängigkeit der Sensitivitätsknoten selbst ist. Die Spannung im Flexibilitätsknoten ist nicht unmittelbar relevant. Auch ist eine stärkere Abhängigkeit der Spannung an den Klemmleisten und somit auch der Sensitivität von der Spannung am Bilanzknoten im Lastfall zu erkennen. Dies ergibt sich aus dem zusätzlich zur Deckung der Leistungsnachfrage benötigten Ausgleich der Verlustleistung, welcher durch das vorgelagerte Netz geleistet werden muss. Die Anpassung eines linearen Regressionsmodells ermöglicht die Berechnung einer Näherung der Sensitivitätswerte durch eine Auswahl der in den Arbeitspunkten vorliegenden Parameter. Eine ausreichend genaue Abschätzung ist bereits durch den Einbezug von drei Einflussgrößen erreicht. Dies ist auch bei ausschließlicher Kenntnis der Leistungswerte der PQ-Lasten möglich. Abschließend stellt die Arbeit eine Gegenüberstellung des besten und schlechtesten Falles der Spannungssensitivität für eine Flexibilitätsanwendung auf. Die Abweichung zwischen den beiden Fällen liegt im unteren zweistelligen Prozentbereich und kann bei einer Summierung der Einflussfaktoren in den untersuchten Fällen annähernd bis zu 30 % betragen. Da sich diese Werte lediglich auf ein simples Testnetz mit drei Knoten beziehen, ist davon auszugehen, dass die Differenzen in komplexeren realen Netzen erheblich größer ausfallen werden.

Anhand der vorgestellten Ergebnisse kann die der Arbeit zugrunde liegende Kenntnis über die Spannungsabhängigkeit der Sensitivität erweitert werden. Neben der Spannung zeigt sich auch die Wirkleistungsbelastung und deren Verteilung im Mittelspannungsnetzstrang als nicht zu unterschätzende Einflussgröße für die Höhe der Spannungssensitivität gegenüber einer Wirkleistungsvariation. Insgesamt ist dieser zusätzliche Einfluss jedoch als

etwas geringer einzuschätzen als die direkte Wirkung der Spannung der jeweiligen Arbeitspunkte.

Die vorliegende Arbeit bietet, sofern einige Informationen über den Zustand des Netzes zur Verfügung stehen, die Möglichkeit, im Voraus die Wirksamkeit einer Flexibilitätsmaßnahme einzuschätzen. Da die Wirtschaftlichkeit maßgeblich von der Effizienz der eingesetzten Leistungsvariation auf den Engpass abhängig ist, kann dies eine wichtige Hilfestellung zur Entscheidungsfindung über die Höhe und den Ort des Einsatzes darstellen. Zudem muss aus Sicht der Netzbetriebsführung hinreichend bekannt sein, wie gut der Engpass durch die eingesetzten Maßnahmen behoben werden kann, um einen Netzbetrieb innerhalb der vorgegebenen Grenzwerte zu gewährleisten. Die Ergebnisse dieser Arbeit können somit in weiterführenden Ansätzen zur Entwicklung von Strategien zum Einsatz von Flexibilitätsmaßnahmen verwendet werden. Es bietet sich zugunsten einer praktikableren Handhabung an, anstatt die exakten Parameter der Arbeitspunkte zu verwenden, aus diesen einzelne Cluster zu bilden. Diese können eine Reihe sich hinsichtlich des Sensitivitätsverhaltens vergleichbare Betriebspunkte enthalten sowie Aussagen über die jeweils niedrigste und höchst mögliche Spannungssensitivität treffen. Für die Planung eines Flexibilitäts-einsatzes sollte hiervon ausgehend stets der nachteiligste Fall der Spannungskorrektur angenommen werden, um eine Überschätzung der Wirksamkeit zu vermeiden [12].


```
36 # Berechnungsmethode: AC Lastfluss, symmetrisch, Mitsystem
37
38 loads = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLod')
39 # Einlesen aller Lasten
40
41 # Lasten mit Wirkleistung [MW] und cos(phi) belegen
42 pmax = 3 # Wirkleistung bis pmax -1
43 pmin = 1 # Wirkleistung ab pmin
44 #anzahl_schritte_cosphi = 3 # 1, 0.95, 0.90
45 anzahl_schritte_cosphi = 1
46 anzahl_recap = 2 # ind, kap
47 #Qs = [] # zur Angabe fester Werter der Blindleistung
48 #anzahl_Qs = len(Qs)
49
50 for k in range(anzahl_recap):
51     for m in range(anzahl_schritte_cosphi):
52         #for m in range(anzahl_Qs):
53             cosphi = 1 #- (m*0.05) # 1: Startwert; 0.05: Schrittweite
54             for i in range(pmin, pmax):
55                 loads[0].mode_inp = "PC"
56                 #loads[0].mode_inp = "PQ"
57                 loads[0].plini = i
58                 #loads[0].qlini = Qs[m]
59                 loads[0].coslini = cosphi
60                 loads[0].pf_recap = k # 0: ind.; 1: kap.
61             for j in range(pmin, pmax):
62                 loads[1].mode_inp = "PC"
63                 #loads[1].mode_inp = "PQ"
64                 loads[1].plini = j
65                 #loads[1].qlini = Qs[m]
66                 loads[1].coslini = cosphi
67                 loads[1].pf_recap = k # 0: ind.; 1: kap.
68             for n in range(pmin, pmax):
69                 loads[2].mode_inp = "PC"
70                 #loads[2].mode_inp = "PQ"
71                 loads[2].plini = n
72                 #loads[2].qlini = Qs[m]
73                 loads[2].coslini = cosphi
74                 loads[2].pf_recap = k # 0: ind.; 1: kap.
75
76             for load in loads:
77                 name = load.loc_name
78                 load_p = load.GetAttribute('plini')
79                 load_cosphi = load.GetAttribute('coslini')
80
81             ldf = app.GetFromStudyCase('ComLdf')
82             # Aufruf des ldf Befehlsobjekts (ComLdf)
83             ldf.Execute() # Ausführen des Lastflussbefehls
84
85             voltages = {}
86             phius = {}
87             Knoten = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmTerm')
88             # Einlesen aller Knoten
89
90             for bus in Knoten:
91                 # Reihenfolge: KL1 KL2 KL3 MS_Sammelschiene
92                 name = bus.loc_name
93                 voltages[bus.loc_name] = bus.GetAttribute('m:u')
94                 phius[bus.loc_name] = bus.GetAttribute('m:phiu')
95
96             lasten_spannungen = pandas.DataFrame(
97                 # Data-Frame zur Ausgabe des Arbeitspunkts
98                 data={'MS_V1_P': [loads[0].plini], 'MS_V1_cosphi':
[loads[0].coslini], 'MS_V1_Q': [loads[0].qlini], 'MS_V2_P':
[loads[1].plini], 'MS_V2_cosphi': [loads[1].coslini], 'MS_V2_Q':
```

```
[loads[1].qlini], 'MS_V3_P': [loads[2].plini], 'MS_V3_cosphi':
[loads[2].coslini], 'MS_V3_Q': [loads[2].qlini], 'MS_V1_U':
[voltages[Knoten[0].loc_name], 'MS_V1_PhiU': [phius[Knoten[0].loc_name]],
'MS_V2_U': [voltages[Knoten[1].loc_name], 'MS_V2_PhiU':
[phius[Knoten[1].loc_name]], 'MS_V3_U': [voltages[Knoten[2].loc_name]],
'MS_V3_PhiU': [phius[Knoten[2].loc_name]], 'MS_SS_U':
[voltages[Knoten[3].loc_name], 'MS_SS_PhiU': [phius[Knoten[3].loc_name]]})
99         #[3] ist MS_SS
100
101         ergebnisse = ergebnisse.append(lasten_spannungen)
102         # Arbeitspunkte anhaengen
103
104         for flexKnoten in Knoten:
105             # Bezugsknoten, an dem die Last variiert wird (flex)
106             app.PrintInfo(flexKnoten)
107             com.c_butldf = ldf # hinterlegte Lastflussrechnung
108             com.p_bus = flexKnoten # Flexibilitaets-Knoten
109             com.Execute() # Sensitivitaetsberechnung ausfuehren
110
111             for sensKnoten in Knoten:
112                 # alle Knoten als betrachtete Knoten fuer Sens-Analyse
113                 # durchlaufen und im DataFrame erfassen
114                 # Sens-Knoten ist der Knoten, an dem die
115                 # Spannungssensitivitaet berechnet wird
116                 sens = sensKnoten.GetAttribute('m:dvdP')
117                 sensDaten_neu = pandas.DataFrame(
118                     data={'Netz': ['Drei_Knoten_Netz'], 'flex_Knoten':
[flexKnoten.loc_name], 'sens_Knoten': [sensKnoten.loc_name],
'U_flex_Knoten': [flexKnoten.GetAttribute('m:u')], 'Typ': ['U'], 'du_dP':
[sens]})
119                 ergebnisse = ergebnisse.append(sensDaten_neu)
120                 # Sensitivitaetsdaten anhaengen
121
122     ErgebnisseSpeichernExcel(ergebnisse,
'Drei_Knoten_Netz_Sensitivitaetsanalyse')
123     app.EchoOn # Reaktiviert die Benutzeroberflaeche
```

A.2 Matlab-Skript zur schrittweisen Erstellung eines linearen Regressionsmodells

Die schrittweise lineare Regressionsanalyse aus Kapitel 3.4 erfolgt in der Programmierumgebung Matlab. Im ersten Schritt werden die Daten mithilfe der Funktion „importfile_ColumnVectors“ eingelesen. Diese wird von Matlab automatisiert erzeugt und interpretiert die tabellarischen Daten als einzelne Spaltenvektoren. Der zweite Schritt führt die einfache lineare Regression für alle angegebenen Ziel- und Einflussgrößen durch. Nach einer Sortierung nach dem Bestimmtheitsmaß wird im vierten Schritt ermittelt, welche Einflussgröße bei ihrer Hinzunahme die größte Verbesserung des Modells ergibt. Schließlich wird in Schritt fünf das Regressionsmodell erstellt sowie dieses nach Hinzunahme eines weiteren Terms jeweils grafisch dokumentiert.

```

1  %% 1. Daten einlesen
2  clear
3  clc
4  close all
5  format long
6  % Funktion zum Einlesen der Daten aus einer csv Datei
7  [Fallnummer, dUKnotendPFlex11, dUKnotendPFlex12, dUKnotendPFlex13, ...
8   dUKnotendPFlex21, dUKnotendPFlex22, dUKnotendPFlex23, ...
9   dUKnotendPFlex31, dUKnotendPFlex32, dUKnotendPFlex33, ...
10 MSV1P, MSV2P, MSV3P, ...
11 MSV1cosphi, MSV2cosphi, MSV3cosphi, ...
12 MSV1Q, MSV2Q, MSV3Q, ...
13 MSV1U, MSV2U, MSV3U, MSSSU, Pges] ...
14 = importfile_ColumnVectors ...
15 ('Drei_Knoten_Netz_Sensitivitaetsanalyse.csv'); % Dateiname
16
17 %% 2. Einfache lineare Regression
18 % Einzelne Untersuchung aller Einflussgrößen mit einfacher linearer
19 % Regression: Korrelationskoeffizient K und Bestimmtheitsmaß B bzw. R2
20 % Untersuchung für alle Einflussgrößen wird einzeln,
21 % welche Einflussgröße das größte Bestimmtheitsmaß B bzw. R2 ergibt
22 M_dUdP = [dUKnotendPFlex13, dUKnotendPFlex23, dUKnotendPFlex33];
23 % betrachtete Zielgrößen
24 M_X = [MSV1P, MSV2P, MSV3P]; % betrachtete Einflussgrößen
25 M_X_name = {'P1', 'P2', 'P3'};
26 m = size(M_dUdP); % Anzahl der Zielgrößen
27 n = size(M_X); % Anzahl der Einflussgrößen
28 n_max = 11; % maximale Anzahl der Einflussgrößen
29 for j = 1:m(2) % Schleife über Anzahl der Zielgrößen
30     for i = 1:n(2) % Schleife über Anzahl der Einflussgrößen
31         korrelationskoeffizient = corrcoef(M_X(:,i), M_dUdP(:,j));
32         % Korrelationskoeffizient je Einflussgröße auf die Zielgröße
33         K(j,i) = korrelationskoeffizient(1,2);
34         % K = Korrelationskoeffizient
35         B(j,i) = korrelationskoeffizient(1,2)^2;
36         % B = Bestimmtheitsmaß (R2)
37     end
38 end
39
40 %% 3. Sortieren der Spalten nach Bestimmtheitsmaß aufsteigend
41 [B_sort, I_B_sort] = sort(B, 2, 'descend');
42 % sortiert Elemente von B in absteigender Reihenfolge in B_sort;
43 % I_B sort: Sammlung von Index-Vektoren der Reihenfolge

```

```

44     for j = 1:m(2)
45         for i = 1:n(2)
46             M_X_sort(:,i,j) = M_X(:,I_B_sort(j,i)); % Einfügen der Spalten
47             M_X_sort_name(j,i) = M_X_name(I_B_sort(j,i));
48             % Variablennamen-Reihenfolge
49         end
50     end
51
52     %% 4. Schrittweise lineares Regressionsmodell erstellen
53     % Ermittlung, welche Hinzunahme das beste Modell ergibt
54     eg(1,:) = [1 1 1];
55     for k = 1:m(2) % Anzahl der Zielgrößen
56         Rq_adj = [];
57         for finde_eg_2 = 1:n(2) % Anzahl der Einflussgrößen
58             if (finde_eg_2 ~= eg(1,k))
59                 mdl = []; M_X = [];
60                 M_X = M_X_sort(:, [eg(1,k), finde_eg_2]);
61                 % Testmodell mit jeweils neuer Spalte
62                 mdl = fitlm(M_X, M_dUdP(:,k));
63                 % lineares Regressionsmodell der Antworten M_dUdP,
64                 % angepasst an die Datenmatrix M_X
65                 Rq_adj(finde_eg_2,1) = mdl.Rsquared.Adjusted;
66                 maximum = max(max(Rq_adj));
67                 eg(2,k) = find(Rq_adj == maximum);
68             end
69         end
70         Rq_adj = [];
71         for finde_eg_3 = 1:n(2)
72             if ((finde_eg_3 ~= eg(1,k)) && (finde_eg_3 ~= eg(2,k)))
73                 mdl = []; M_X = [];
74                 M_X = M_X_sort(:, [eg(1,k), eg(2,k), finde_eg_3]);
75                 mdl = fitlm(M_X, M_dUdP(:,k));
76                 Rq_adj(finde_eg_3,1) = mdl.Rsquared.Adjusted;
77                 maximum = max(max(Rq_adj));
78                 eg(3,k) = find(Rq_adj == maximum);
79             end
80         end
81     end
82
83     for j = 1:3
84         for i = 1:n(2) % Anzahl der Einflussgrößen
85             M_X_sort_name_modell(j,i) = M_X_sort_name(j, eg(i,j));
86         end
87     end
88
89     %% 5. Schrittweise lineares Regressionsmodell erstellen
90     % 5.1 Lineares Regressionsmodell der Antworten dUKnoten/dPFlex,
91     % angepasst an die Datenmatrix erstellen
92     % 5.2 Modell um je einen Term der Einflussgröße erweitern
93     % 5.3 Bestimmtheitsmaß R2 (Bzw. R2adj) des aktuellen Modells bestimmen
94     % 5.4 Modell zusammen mit dUKnoten/dPFlex plotten
95     Rq = [];
96     Rq_adj = [];
97     knoten_sens = 3; % Knoten der Sensitivität (aus M_dUdP)
98     for j = 1:m(2) % Anzahl der Zielgrößen
99         knoten_flex = j;
100        flex_sens = 10*knoten_flex + knoten_sens;
101        % Zehnerziffer: Knoten der Flexibilität;
102        % Einerziffer: Bezugsknoten der Sensitivität
103        figure(flex_sens);
104        fig = figure(flex_sens);
105        for i = 1:n(2) % Anzahl der Einflussgrößen
106            mdl = [];
107            M_X = [];
108            if (i==1) M_X = M_X_sort(:, [eg(1,j)]);

```

```
109     elseif (i==2) M_X = M_X_sort(:, [eg(1,j),eg(2,j)]);
110     elseif (i==3) M_X = M_X_sort(:, [eg(1,j),eg(2,j),eg(3,j)]);
111     end % aktuelle Matrix erstellen
112     mdl = fitlm(M_X,M_dUdP(:,j)); % lineares Regressionsmodell
113     % der Antworten M_dUdP, angepasst an die Datenmatrix M_X
114     Rq(j,i) = mdl.Rsquared.Ordinary;
115     Rq_adj(j,i) = mdl.Rsquared.Adjusted;
116     Coeff = [];
117     Coeff = mdl.Coefficients{:, :};
118     % Koeffizientenschätzungen für jeden Term im Modell
119     y = [];
120     M_X(:, (i+1):n_max) = 0; % Spalten mit 0 auffüllen
121     Coeff((i+2):(n_max+1), :) = 0; % Zeilen mit 0 auffüllen
122     % Modellformel: y=b0+b1X1+b2X2 usw.
123     y = Coeff(1,1)+Coeff(2,1)*M_X(:,1) ...
124         +Coeff(3,1)*M_X(:,2)+Coeff(4,1)*M_X(:,3);
125     subplot(3,1,i); % Subplotgröße und Nummer
126     hold on;
127     xlim([0.95 1.05]); xticks([0.95 0.975 1 1.025 1.05]);
128     if (j==1)
129         ylim([0.00147 0.00172]); yticks([0.0015 0.0016 0.0017]);
130     elseif (j==2)
131         ylim([0.0028 0.0036]); yticks([0.0028 0.0032 0.0036]);
132     elseif (j==3)
133         ylim([0.0043 0.0053]); yticks([0.0043 0.0048 0.0053]);
134     end
135     plot(MSV3U,M_dUdP(:,j), 'b. ');
136     plot(MSV3U,y, 'r. ');
137     set(gca, 'fontname', 'cambria');
138     hold off;
139 end
140
141 str = "dU_{Knoten}/dP_{Flex} '" + ...
142     knoten_flex + ", " + knoten_sens + "'";
143 legend(str, 'lineares Regressionsmodell', ...
144     'Position', [0.7 0.25 0.05 0.1]);
145
146 achsen_label=axes(fig, 'visible', 'off');
147 achsen_label.Title.Visible='on';
148 achsen_label.XLabel.Visible='on';
149 achsen_label.YLabel.Visible='on';
150 xlabel(achsen_label, 'U_3 [p. u.]');
151 ylabel(achsen_label, 'dU_{Knoten}/dP_{Flex} [p. u./MW]');
152 set(gca, 'fontname', 'cambria');
153 end
```

Anhang B Diagramme verschiedener Sensitivitätsverläufe

B.1 Sensitivitätsverläufe von Arbeitspunkten mit ausschließlichem Wirkleistungsfluss an den PQ-Lasten

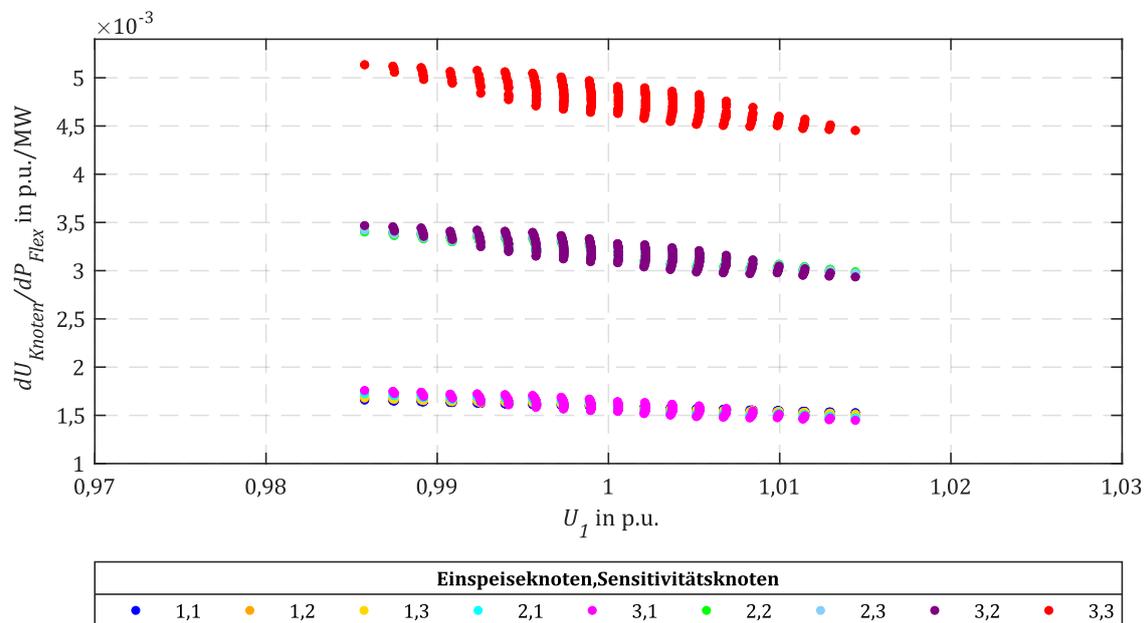


Abbildung B.1: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL1

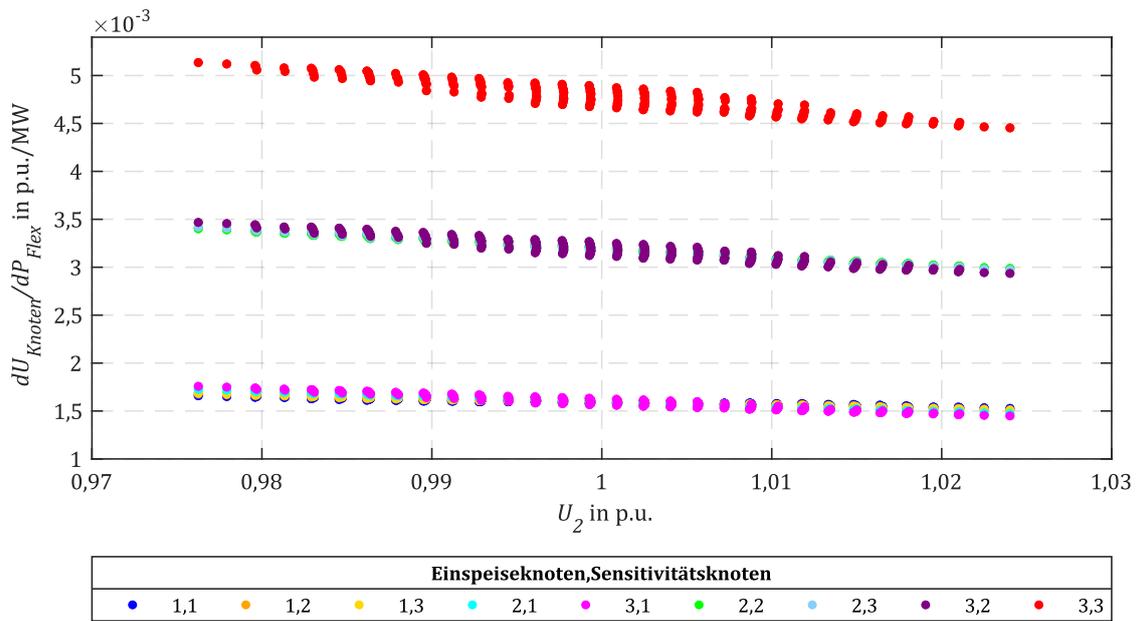


Abbildung B.2: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL2

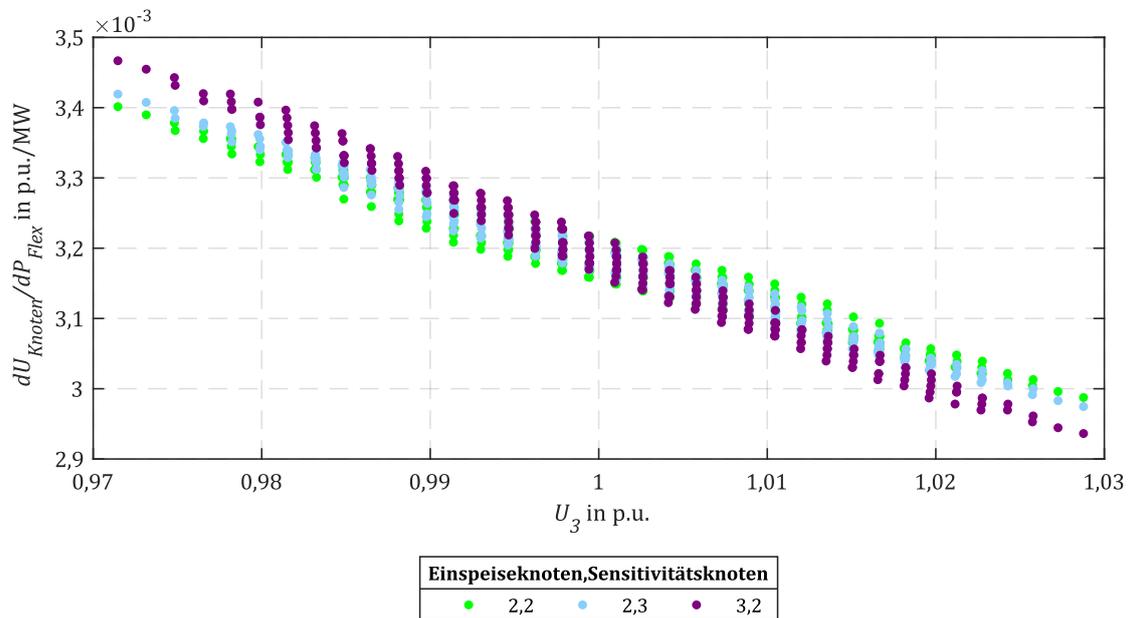


Abbildung B.3: Sensitivitäten aufgetragen über die Spannung an KL3; mittleres Sensitivitätsniveau

B.2 Sensitivitätsverläufe bei variabler Spannung am Slack-Knoten

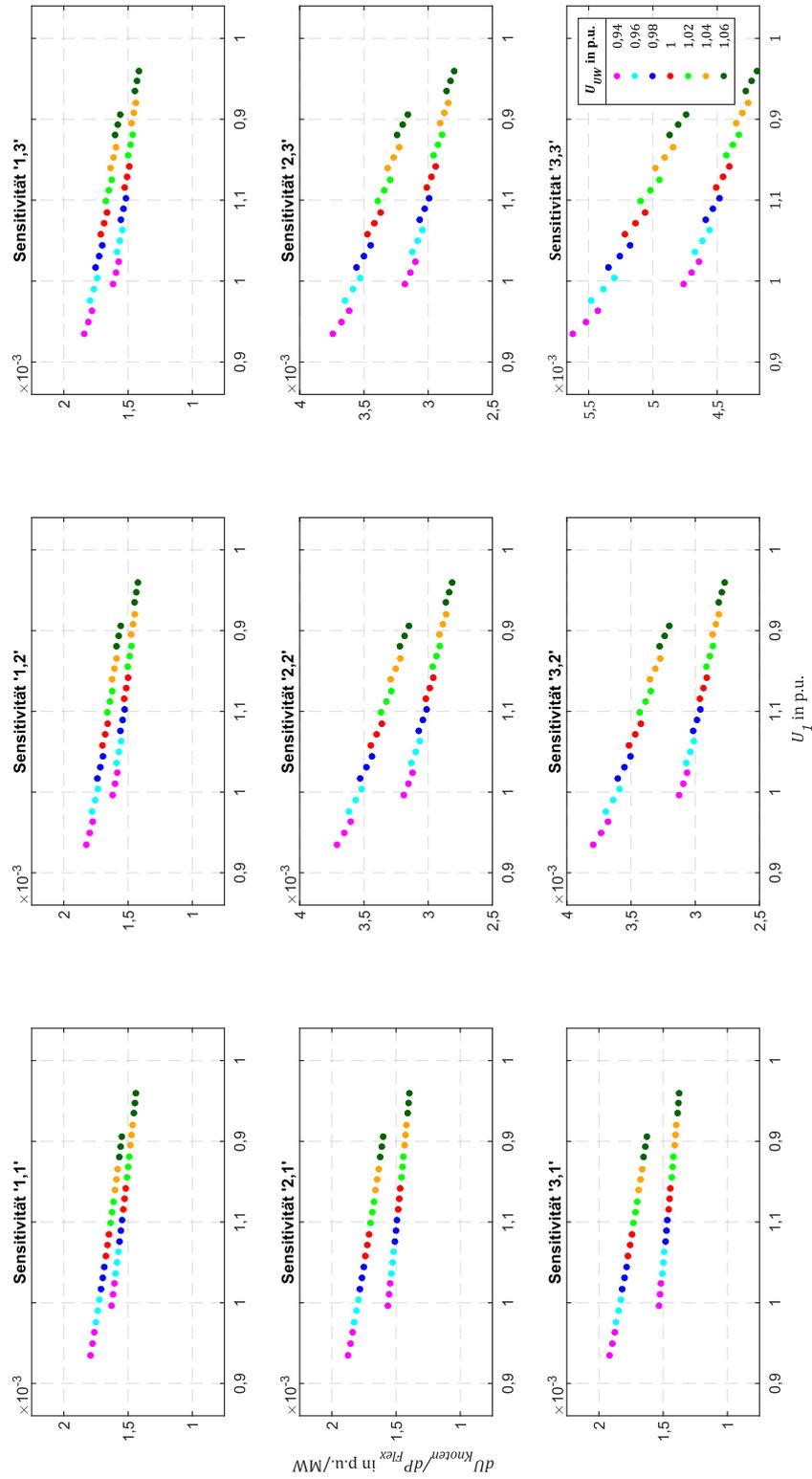


Abbildung B.4: Sensitivitäten '1,1', '1,2', '1,3', '2,1', '2,2', '2,3', '3,1', '3,2' und '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL1

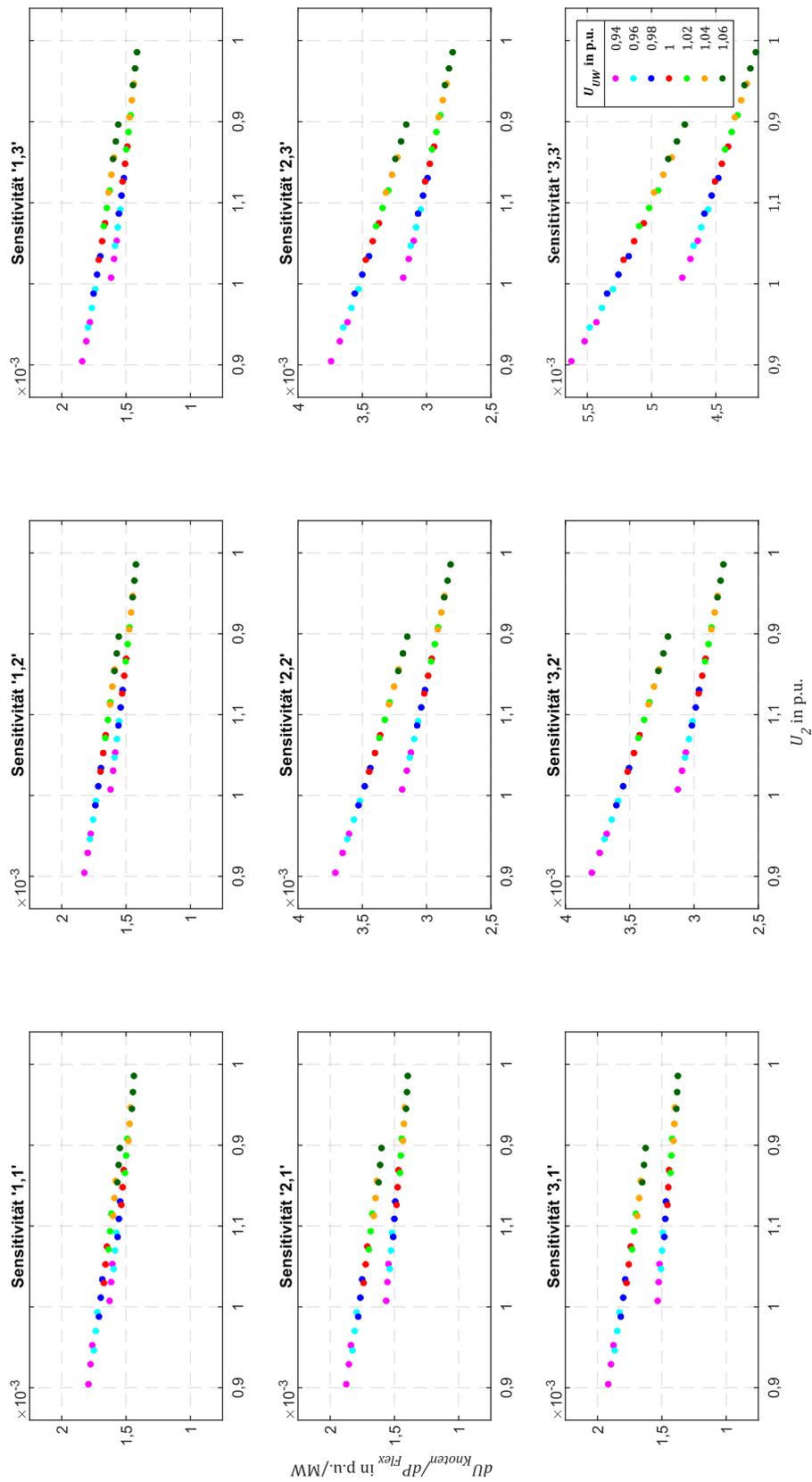


Abbildung B.5: Sensitivitäten '1,1', '1,2', '1,3', '2,1', '2,2', '2,3', '3,1', '3,2' und '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL2

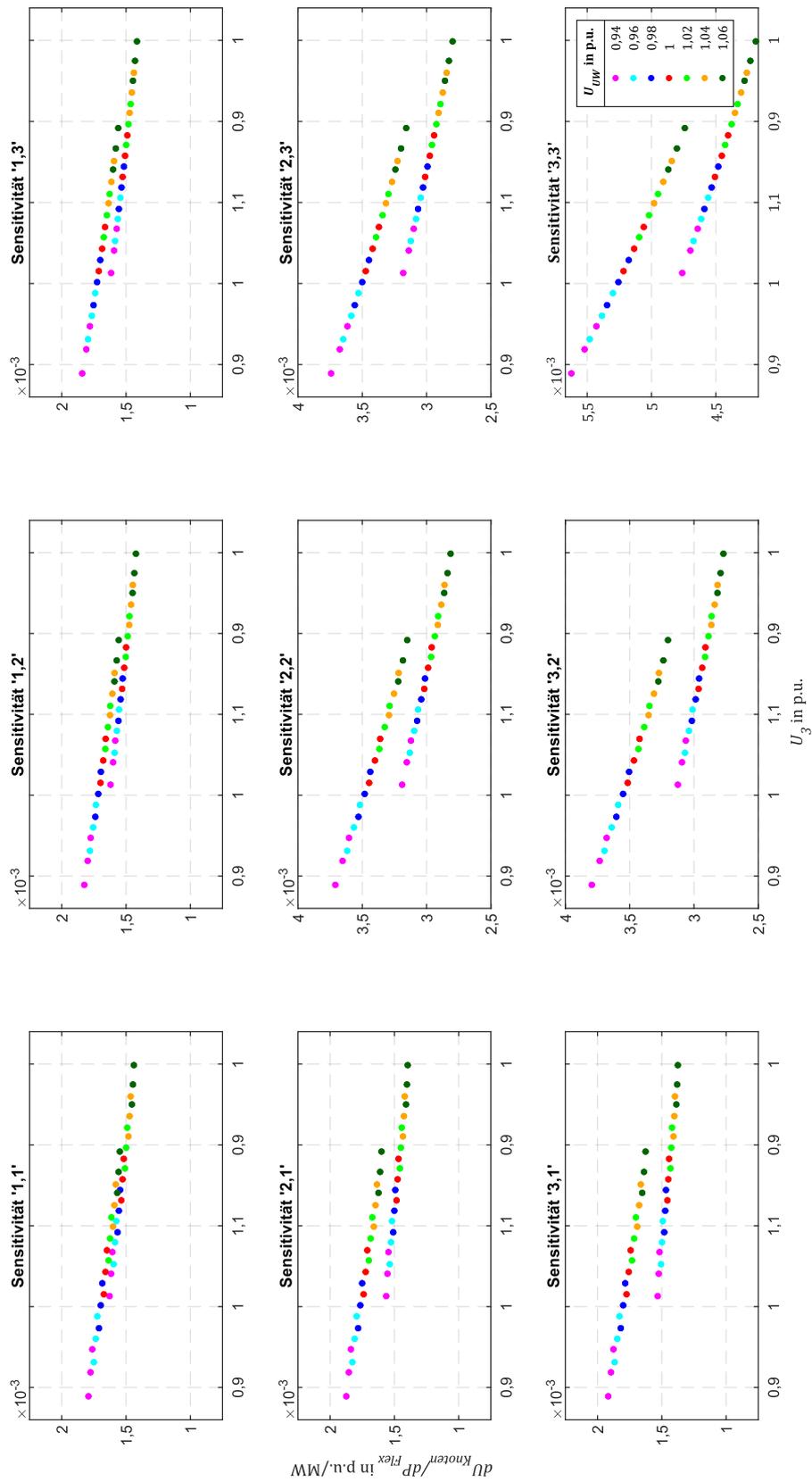


Abbildung B.6: Sensitivitäten '1,1', '1,2', '1,3', '2,1', '2,2', '2,3', '3,1', '3,2' und '3,3' aufgetragen über die Spannung an KL3

Anhang C Regressionsanalyse

Tabelle C.1: Bestimmtheitsmaße der einfachen linearen Regressionsanalyse zur Ermittlung der signifikanten Einflussgrößen auf die Sensitivitäten

Zielgröße	Einflussgrößen		
Sensitivität	U_1	U_2	U_3
'1,1'	0,95323	0,88301	0,81772
'2,1'	0,83700	0,92213	0,88975
'3,1'	0,75951	0,86779	0,91375
'1,2'	0,95102	0,95186	0,89833
'2,2'	0,82529	0,94440	0,91898
'3,2'	0,73386	0,86782	0,92894
'1,3'	0,93006	0,95680	0,94736
'2,3'	0,81268	0,94071	0,94702
'3,3'	0,71935	0,85326	0,93755

Sensitivität:	P_1	P_2	P_3
'1,1'	0,32712	0,32823	0,32856
'2,1'	0,08517	0,4543	0,45470
'3,1'	0,05132	0,27371	0,67044
'1,2'	0,20973	0,37980	0,38032
'2,2'	0,05263	0,46451	0,46501
'3,2'	0,02916	0,25718	0,70255
'1,3'	0,16981	0,30764	0,48489
'2,3'	0,04453	0,39289	0,53959
'3,3'	0,02658	0,20434	0,74921

Sensitivität:	Q_1	Q_2	Q_3	$\cos\varphi$
'1,1'	0,00485	0,00487	0,00487	0,00000
'2,1'	0,00128	0,00131	0,00131	0,00000
'3,1'	0,00078	0,00081	0,00082	0,00000
'1,2'	0,00313	0,01245	0,01247	0,00001
'2,2'	0,00174	0,00696	0,00696	0,00000
'3,2'	0,00097	0,00389	0,00391	0,00000
'1,3'	0,00254	0,01012	0,02266	0,00001
'2,3'	0,00148	0,00591	0,01319	0,00000
'3,3'	0,00126	0,00503	0,01125	0,00000

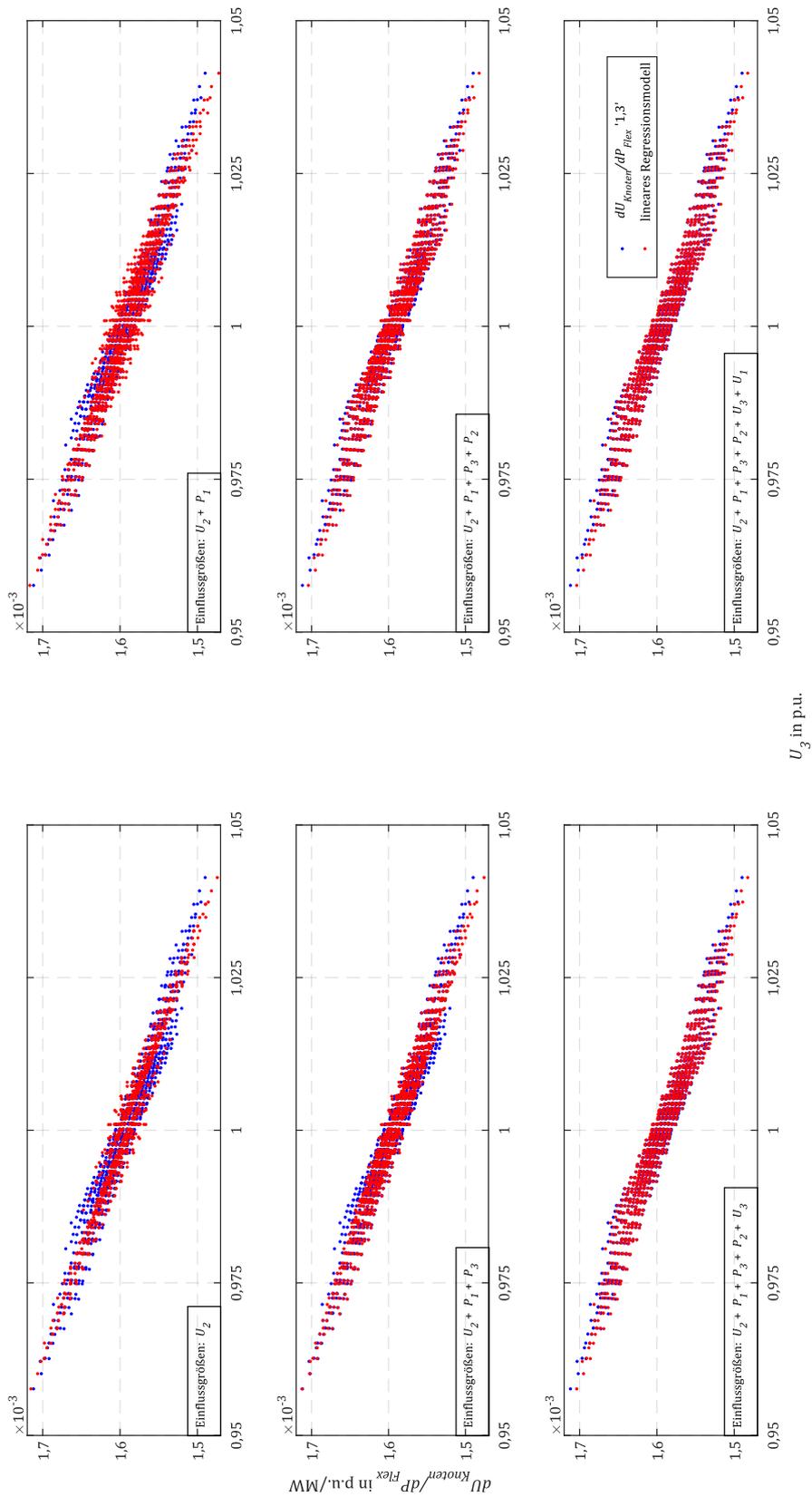


Abbildung C.1: Schrittweises lineares Regressionsmodell der Zielgröße $\frac{dU_{Knoten}}{dP_{Flex}}$ '1,3' von den Einflussgrößen in der Reihenfolge der maximalen Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes

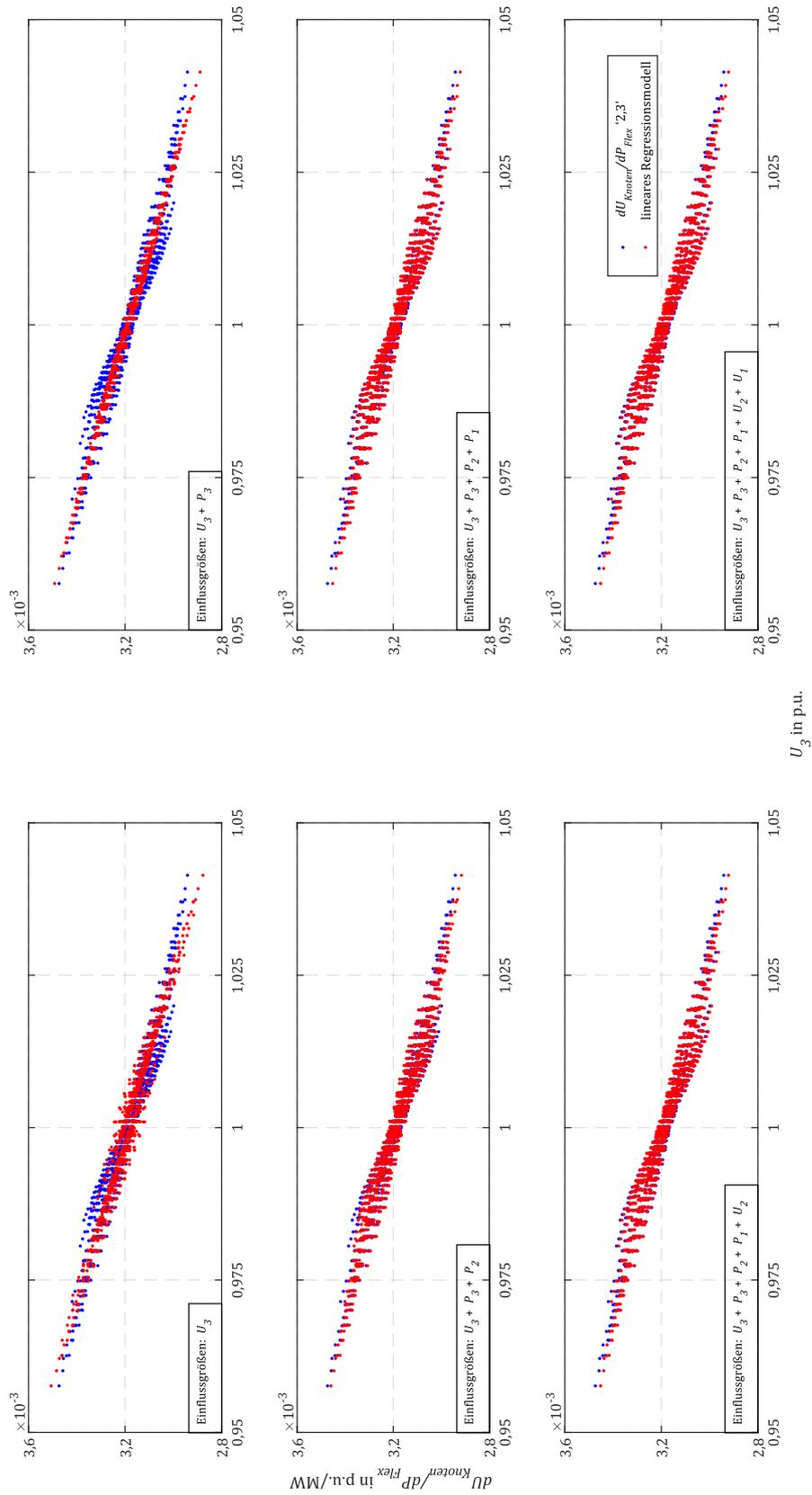
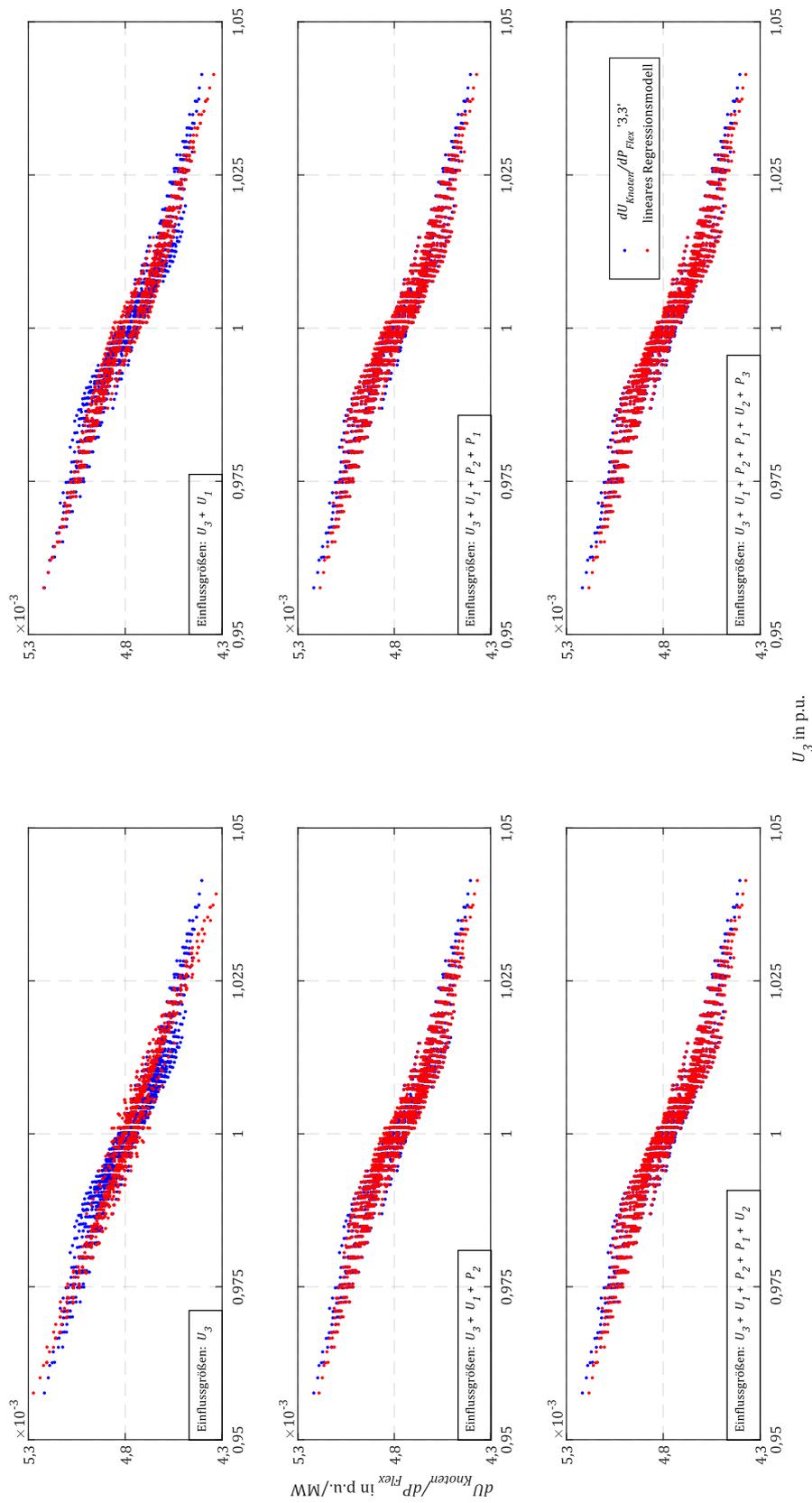


Abbildung C.2: Schrittweises lineares Regressionsmodell der Zielgröße dU_{Knoten}/dP_{Flex} '2,3' von den Einflussgrößen in der Reihenfolge der maximalen Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes



U_3 in p.u.

Abbildung C.3: Schrittweises lineares Regressionsmodell der Zielgröße $\frac{dU_{Knoten}}{dP_{Flex}} '3,3'$ von den Einflussgrößen in der Reihenfolge der maximalen Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes

Tabelle C.2: Einflussgrößen auf die Sensitivitäten sortiert nach der Aufnahmereihenfolge in das lineare Regressionsmodell

Zielgröße	Einflussgrößen					
Sensitivität	nach Aufnahmereihenfolge in das lineare Regressionsmodell sortiert					
'1,1'	U ₁	P ₃	P ₂	P ₁	U ₂	U ₃
'2,1'	U ₂	U ₃	P ₃	P ₂	P ₁	U ₁
'3,1'	U ₃	P ₃	P ₂	P ₁	U ₁	U ₂
'1,2'	U ₂	P ₁	P ₃	P ₂	U ₁	U ₃
'2,2'	U ₂	U ₃	P ₃	P ₂	P ₁	U ₁
'3,2'	U ₃	P ₃	P ₂	P ₁	U ₁	U ₂
'1,3'	U ₂	P ₁	P ₃	P ₂	U ₃	U ₁
'2,3'	U ₃	P ₃	P ₂	P ₁	U ₂	U ₁
'3,3'	U ₃	U ₁	P ₂	P ₁	U ₂	P ₃

Tabelle C.3: Adjustiertes Bestimmtheitsmaß des Modells der Sensitivitäten der multiplen Regression nach Aufnahme je einer zusätzlichen Einflussgröße

Zielgröße	adjustiertes Bestimmtheitsmaß des Modells der multiplen Regression					
Sensitivität						
'1,1'	0,95319	0,95556	0,96146	0,99899	0,99899	0,99899
'2,1'	0,83685	0,88073	0,98898	0,99838	0,99838	0,99838
'3,1'	0,75929	0,92761	0,99262	0,99812	0,99812	0,99812
'1,2'	0,95181	0,95178	0,95181	0,99868	0,99868	0,99868
'2,2'	0,94434	0,95260	0,99218	0,99845	0,99844	0,99844
'3,2'	0,86770	0,97312	0,99479	0,99816	0,99816	0,99816
'1,3'	0,95676	0,96766	0,96777	0,99719	0,99857	0,99857
'2,3'	0,94065	0,96635	0,99449	0,99752	0,99832	0,99832
'3,3'	0,85312	0,98730	0,99688	0,99764	0,99834	0,99833

Literatur

- [1] K. F. Schäfer, *Netzberechnung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [2] BMWi, „Erneuerbare Energien in Zahlen 2019: Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2019“, 2020.
- [3] Bundesnetzagentur, Hg., „Flexibilität im Stromversorgungssystem: Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität“. Diskussionspapier, 2017.
- [4] Bundesnetzagentur, Hg., „Quartalsbericht Netz- und Systemsicherheit - Gesamtes Jahr 2019“, 2020.
- [5] Y. Severin, S. Mischinger, A. R. D. Müller, H. Seidl, W. Fritz und L. Bangert, „Regulatorischer Handlungsbedarf zur Erschließung und Nutzung netzdienlicher Flexibilität: dena-Analyse“, 2019.
- [6] S. Mischinger, Y. Severin und A. R. D. Müller, „Netzdienlicher Einsatz von Flexibilitäten: 10 Leitsätze zur Entwicklung eines zukunftsfähigen regulatorischen Rahmens“. dena-Positionspapier, 2019.
- [7] BMWi, „Strom 2030: Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre“. Ergebnispapier, 2017.
- [8] Y. Severin, S. Mischinger, A. R. D. Müller und H. Seidl, „Regulatorischer Handlungsbedarf zur Erschließung und Nutzung netzdienlicher Flexibilität“. dena-Analyse, 2019.
- [9] R. Tonkoski, L. A. C. Lopes und T. H. M. El-Fouly, „Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention“, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Jg. 2, Nr. 2, S. 139–147, 2011, doi: 10.1109/TSTE.2010.2098483.
- [10] M. Wagler und R. Witzmann, „Sensitivity analysis - a key element for the operation of a flexible distribution grid“ in *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Dallas, TX, USA, 03.05.2016 - 05.05.2016, doi: 10.1109/TDC.2016.7520000.
- [11] T. Kolacia und J. Drapela, „Voltage sensitivity to power flows related to distributed generation“ in *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power*

- Engineering (EPE)*, Prague, Czech Republic, 16.05.2016 - 18.05.2016, doi: 10.1109/EPE.2016.7521809.
- [12] T. Sippenauer, O. Brückl und M. Henneke, „Verankerung von Flexibilität in der Netzplanung“ in *Zukünftige Stromnetze*, online, 27.-28. Januar 2021; 03.-04. Februar 2021, S. 79–92.
- [13] I. Kasikci, *Planung von Elektroanlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [14] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz, *Elektrische Energieversorgung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [15] A. J. Schwab, *Elektroenergiesysteme: Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende*, 6. Aufl. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [16] R. Marenbach, J. Jäger und D. Nelles, *Elektrische Energietechnik*, 3. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020.
- [17] T. Harriehausen und D. Schwarzenau, *Moeller Grundlagen der Elektrotechnik*, 24. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020.
- [18] O. Brückl und M. Haslbeck, „Endbericht zum Dienstleistungsauftrag "Zukünftige Bereitstellung von Blindleistung und anderen Maßnahmen für die Netzsicherheit": im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie“, INA - Institut für Netz- und Anwendungstechnik GmbH, 2016.
- [19] DIgSILENT GmbH, Hg., „PowerFactory 15: Benutzerhandbuch“, 2013.
- [20] DIgSILENT GmbH, Hg., „Overhead Line Models: Technical Reference“. PowerFactory 2020.
- [21] DIgSILENT GmbH, Hg., „PowerFactory 2020: Benutzerhandbuch“, 2020.
- [22] K. Backhaus, B. Erichson, W. Plinke und R. Weiber, *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*, 15. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [23] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*, 8. Aufl. München: Hanser, 2013.